УДК 533.6.013.42:518.12

Посадка спускаемых объектов с замкнутым сферообразным пневмоамортизатором

С. С. Комаров, Н. И. Мискактин, Н. Ю. Цвиленева

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

Аннотация. Рассматривается посадка спускаемого объекта с замкнутым пневмоамортизатором. Строится математическая модель посадки системы «объект–пневмоамортизатор». Нелинейные граничные условия в заделке пневмоамортизатора на корпусе спускаемого объекта и в зоне контактного взаимодействия с экраном вводятся в виде силовых членов в уравнения движения системы «объект–пневмоамортизатор».

Ключевые слова: пневмоамортизатор, посадка, спускаемый объект, упругая деформация, экран

1 Введение

В последнее время широкое применение в авиационной и космической технике нашли конструкции из мягких оболочек различной раскройной формы (парашюты, дирижабли и т.п.).

Мягкооболочечные конструкции используются также в качестве посадочных устройств (ПУ) для возвращаемых космических станций и фрагментов носителей.

Как правило, при проектировании посадочных устройств спускаемых объектов (СО) отсутствуют данные о скорости ветра и о характеристиках грунта планеты; поэтому применяются устройства со всенаправленной амортизацией («Луна – 16, 20», «Венера – 4, 8», марсианские станции США), которые выполнены в виде сферообразных оболочек [1].

В работах [2, 3] авторами предложен численный алгоритм расчета упругой деформации конусообразных пневмоамортизаторов, в котором поверхность пневмоконструкции представляется в виде ортогональной

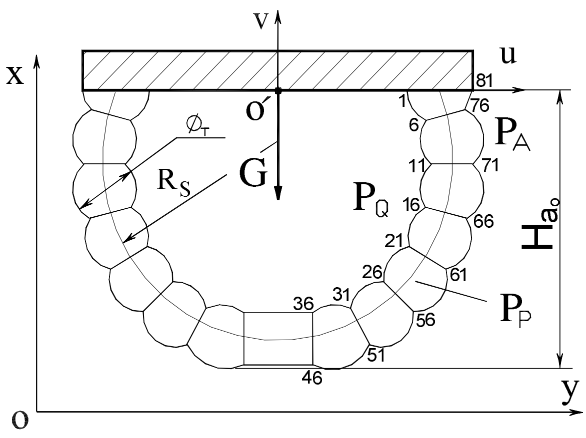

Рис. 1: Системы координат, принятые при построении модели

сетки расчетных элементов. Описание напряженно-деформированного состояния (НДС) осуществляется через тангенциальные натяжения, а механические свойства применяемых тканых материалов описываются погонными модулями упругости.

2 Математическая модель посадки спускаемого объекта

Рассматривается посадка спускаемого объекта со сферообразным всенаправленным пневмоамортизатором (ПА).

Движение спускаемого объекта описывается в неподвижной системе координат OXY, движение элементов оболочки ПА описывается в подвижной системе координат OUV, связанной с жестким корпусом спускаемого объекта (Рис. 1).

Математическая модель посадки СО с ПУ описывает движение материальной системы, состоящей из объекта и пневмоконструкции (ПК) амортизатора, связанных между собой нелинейными упругими связями.

Математическая модель посадки системы «объект — сферообразный амортизатор» включает уравнения движения объекта, уравнения упругой деформации ПА и уравнения массообмена (Рис. 2).

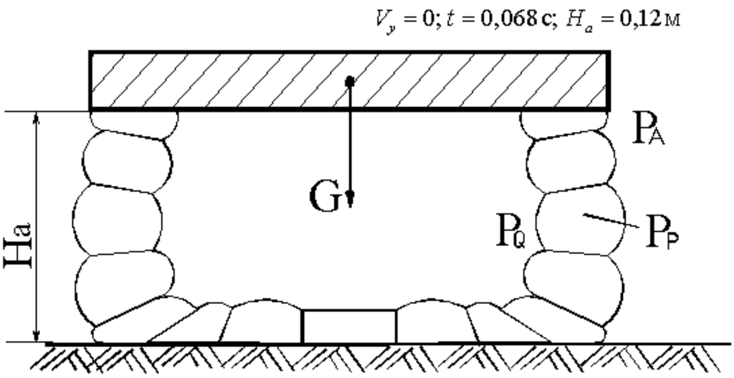

Рис. 2: Формообразование замкнутого сферообразного пневмоамортизатора

2.1. Уравнения движения объекта имеют вид:

$$\begin{aligned} &m_0\left(\dot{V}_0 + \bar{\omega}\ \times \bar{V}_0\right) = m_0 g + R_p + R_c, \\ &J_0\left(\dot{\omega}\right) + \left(\bar{\omega}\ \times J_0\bar{\omega}_0\right) = M_p + M_c, \end{aligned} \tag{1}$$

где m_0 — масса объекта, J_0 — тензор инерции объекта относительно центра масс, V_0 — вектор абсолютной скорости объекта, ω — вектор угловой скорости объекта, R_p, M_p — силы и моменты сил давления, R_c, M_c — результирующая сила реакции ПК и создаваемый ею момент.

2.2. Уравнения движения пневмоамортизатора записывается в виде системы дифференциальных уравнений движения элементов оболочки. Пневмоконструкция разбивается в пространстве набором $N \times m$ элементов, в центре которых сосредоточены их массы. Элементы связаны между собой упругими и демпфирующими силами — аналогами реальных усилий, реализуемых при работе пневмоконструкции:

$$\begin{aligned} &m_{ij}\left(\ddot{u}_{ij} + \ddot{x}\right) + C_a\left(\dot{u}_{ij} + \dot{x}\right) + C_r\left(2\dot{u}_{ij} - \dot{u}_{ij-1} - \dot{u}_{ij+1}\right) = F_{u_{ij}}\left(u, v\right), \\ &m_{ij}\left(\ddot{v}_{ij} + \ddot{y} + g\right) + C_a\left(\dot{v}_{ij} + \dot{x}\right) + C_r\left(2\dot{v}_{ij} - \dot{v}_{ij-1} - \dot{v}_{ij+1}\right) = \\ &= F_{v_{ij}}\left(u, v\right), \end{aligned} \tag{2}$$

где $\ddot{u}_{ij}$, $\ddot{v}_{ij}$, $\dot{u}_{ij}$, $\dot{v}_{ij}$ — соответственно проекции ускорений и скоростей j-го элемента m-сечения ПА в системе координат OUV; $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\dot{x}$, $\dot{y}$ — проекции ускорения и скорости спускаемого объекта в системе координат

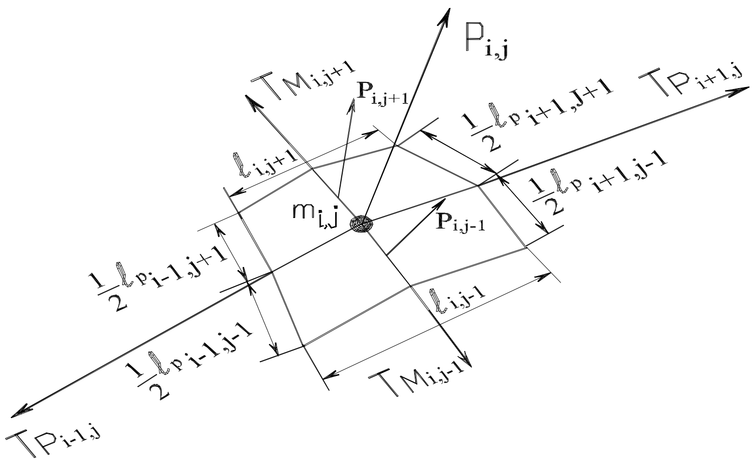

Рис. 3: Равновесие элемента мягкой оболочки.

OXY, причем ось OY совпадает по направлению с осью OV; C_a — коэффициент демпфирования по абсолютной скорости элементов, C_r — коэффициент демпфирования по скорости соседних элементов каркаса друг относительно друга, который вводится для исключения высокочастотных осцилляций элементов расчетной сетки (коэффициент диссипации энергии в ткани); m_{ij} — масса выделенного элемента мягкой оболочки ПА (Рис. 3), причем $m_{ij} = \frac{M}{N}$, где M — масса пневмоконструкции; N — число элементов.

В случае осесимметричного нагружения, реализуемого при вертикальном снижении объекта на ровную горизонтальную поверхность, задача сводится к осесимметричной.

Система уравнений (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} &m_j \ddot{u}_j + C_a \left(2\dot{u}_j - \dot{u}_{j-1} - \dot{u}_{j+1}\right) = F_{u_j}\left(u, v\right), \\ &m_j \left(\ddot{v}_j + \ddot{y} + g\right) + C_a \left(\dot{v}_j + \dot{y}\right) + C_r \left(2\dot{v}_j - \dot{v}_{j-1} - \dot{v}_{j+1}\right) = F_{v_j}\left(u, v\right). \end{aligned} \tag{3}$$

Проекции суммарных сил, действующих между элементами i,j равны:

$$\begin{aligned} F_{u_{ij}}\left(u, v\right) = K_{u_{ij}}\left(u, v\right) + R_{u_{ij}}\left(u, v\right), \\ F_{v_{ij}}\left(u, v\right) = K_{v_{ij}}\left(u, v\right) + R_{v_{ij}}\left(u, v\right), \end{aligned} \tag{4}$$

где $K_{\xi_{ij}}\left(u, v\right)$ — система упругих сил, возникающих в конструкции при деформации под действием внешних сил; $R_{\xi_{ij}}\left(u, v\right)$ — система внешних сил.

Проекции сил, действующих в узлах i, j в общем случае имеют вид:

$$\begin{aligned} F_{\xi_{i,j}} = {} & TM_{\xi_{i,j+1}} + TM_{\xi_{i,j-1}} + TP_{\xi_{i,j+1}} + TP_{\xi_{i,j-1}} + \\ & + TS_{\xi_{i,j_k}} + P_{\xi_{i,j}} + FN_{\xi_{i,j}} + TB_{\xi_{i,j}}, \end{aligned} \tag{5}$$

где ξ — обобщенная координата ($\xi \Rightarrow u, v$); $TM_{\xi_{i,j+1}}, TM_{\xi_{i,j-1}}$ — проекции результирующих меридиональных сил натяжения, действующих на i,j-й элемент со стороны $i, j+1$-го и $i, j-1$-го элемента; $TP_{\xi_{i+1,j}}$, $TP_{\xi_{i-1,j}}$ — проекции широтных сил, действующих на i, j-ю точку со стороны $i+1, j$-го и $i-1, j$-го широтных отрезков; $FN_{\xi_{ij}}$ — нормальная сила при взаимодействии участка поверхности с j-й точкой с опорной поверхностью; $TB_{\xi_{ij}}$ — штрафующие силы при взаимном проникновении элементов ПК.

Широтные и меридиональные силы определяются по соответствующим погонным усилиям (см. Рис. 3):

$$\begin{aligned} TM_{\xi_{i,j+1}} &= \tfrac{1}{2} t_{M_{\xi_{i,j+1}}} \left(l_{P_{i+1,j+1}} + l_{P_{i-1,j+1}} \right), \\ TM_{\xi_{i,j-1}} &= \tfrac{1}{2} t_{M_{\xi_{i,j-1}}} \left(l_{P_{i+1,j-1}} + l_{P_{i-1,j-1}} \right), \\ TP_{\xi_{i+1,j}} &= \tfrac{1}{2} t_{P_{\xi_{i+1,j}}} \left(l_{i+1,j+1} + l_{i+1,j-1} \right), \\ TP_{\xi_{i-1,j}} &= \tfrac{1}{2} t_{P_{\xi_{i-1,j}}} \left(l_{i-1,j+1} + l_{i-1,j-1} \right). \end{aligned} \tag{6}$$

Силы TS_{i,j_k}, развивающиеся на диафрагмах в радиальном направлении, вычисляются по погонным усилиям:

$$TS_{\xi_{i,j_k}} = \frac{1}{2} t_{S_{\xi_{i,j_k}}} \left(l_{P_{i,j_k}} + l_{P_{i,j_l}} \right). \tag{7}$$

Для моделирования взаимодействия ПК с посадочной поверхностью вводится нормальная сила FN, действующая на точки контактирующего участка ПА. Она задается в виде функции 5-го порядка от величины «проникновения» элемента в опорную поверхность (Рис. 4(а)).

$$FN_{\xi_{i,j}} = \begin{cases} 0 & \text{при } \xi_{i,j} \geq \xi_k, \\ \xi_{i,j}^5 - \phi_{v_{i,j}} & \text{при } \xi_{i,j} < \xi_k, \end{cases} \tag{8}$$

где $\phi_{v_{i,j}} = 0,1 \left(\dot{\xi}_{i,j} + \dot{y} \right)$ — демпфирующая сила; ξ_k — координата, характеризующая расстояние до посадочной поверхности в подвижной системе координат, связанной с телом.

Силы давления $P_{i,j}$, приложенные в узлах сетки i,j, могут быть представлены как результирующие силы давления P, действующей на элемент, охватывающий i,j-й отрезок (Рис. 4(б)), каждая из которых делится пополам и считается приложенной на концах отрезков:

$$\begin{aligned} P_{i,j+1} &= \tfrac{1}{2} \Delta p \left(l_{P_{i+1,j+1}} + l_{P_{i-1,j+1}} \right) l_{i,j+1}, \\ P_{i,j-1} &= \tfrac{1}{2} \Delta p \left(l_{P_{i+1,j-1}} + l_{P_{i-1,j-1}} \right) l_{i,j-1}, \end{aligned} \tag{9}$$

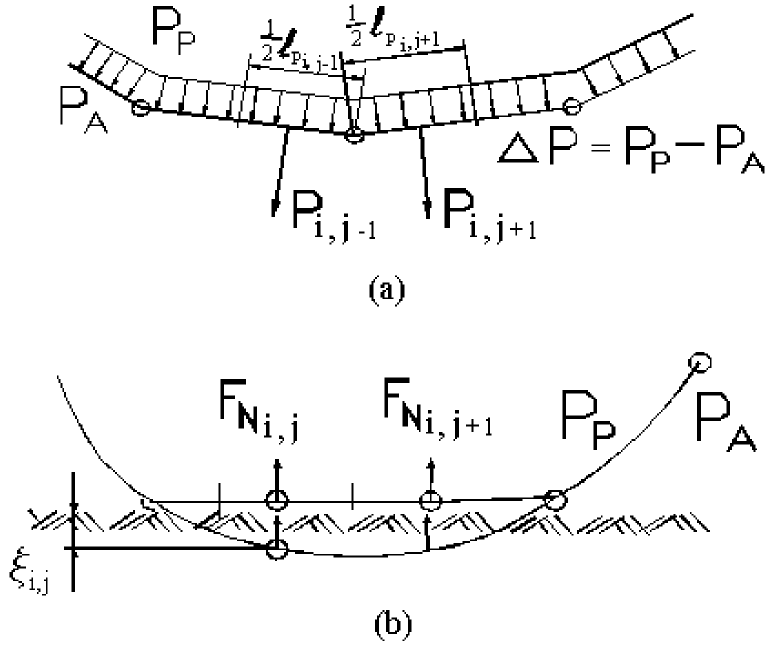

Рис. 4: Силы взаимодействия пневмоконструкции с экраном

где $P_{i,j+1}$, $P_{i,j-1}$ — силы давления, действующие на i,j-й элемент со стороны $j+1$-го и $j-1$-го элементов; Δp — перепад давления, причем

$$\Delta p = \begin{cases} P_p - P_Q & \text{для элементов внутренней стенки,} \\ P_p & \text{для элементов внешней стенки} \end{cases}$$

где P_p — давление в пневмоконструкции; P_Q — давление в сферообразной оболочке.

Проекции суммарной силы давления, приложенной в j-й точке, определяются как

$$P_{\xi_{i,j}} = P_{\xi_{i,j+1}} + P_{\xi_{i,j-1}}. \tag{10}$$

Силы натяжения могут быть связаны с перемещениями узлов сетки любым законом. В данной работе принят закон Гука:

$$T_j = E_j \varepsilon_j, \tag{11}$$

где E_j — модуль упругости i-го элемента сетки; ε_j — относительное удлинение j-го элемента сетки.

2.3. Уравнения массообмена для любой секции ПА имеет вид:

$$\frac{d}{dt}\left(\rho_i w_i\right) = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} = \sum_{j=1}^{n} Q_{ij}. \tag{12}$$

При адиабатическом процессе изменения состояния рабочего тела связь параметров выражается в виде: ${}^{\rho_i}\!/_{\rho_a} = \left({}^{\rho_i}\!/_{\rho_a}\right)^{1/\gamma} = \left({}^{T_i}\!/_{T_a}\right)^{1/\gamma - 1}$.

Изменение давления рабочего тела в отсеках ПК на каждом шаге интегрирования системы (7) определяется в виде:

$$P_i = \frac{\gamma P_i \left(Q_{\text{вх}_i} - Q_{\text{вых}_i} - \rho \frac{dW_i}{dt}\right)}{\rho W_i}, \tag{13}$$

где i — номер отсека; γ — показатель адиабаты; $Q_{\text{вх}_i}$, $Q_{\text{вых}_i}$ — расходы рабочего тела, входящего и выходящего в i-й отсек ПК; ρ — плотность рабочего тела; W_i — объем i-го отсека.

Описанная выше расчетная сетка накладывается на пневмокаркас конструкции в предположении, что его начальная и раскройная формы совпадают. Узловым точкам присваиваются значения $u_{0_{i,j}}$, $v_{0_{i,j}}$, полученные из вычислительной программы генерации формы на основе теоретического чертежа пневмоамортизатора [2].

Шаг по времени для расчета НДС ПК при динамическом нагружении определяется из условия Куранта [2], т.е. шаг прямо пропорционален линейному размеру элемента сетки и обратно пропорционален квадратному корню из погонного модуля упругости материала оболочки.

Проведенные ранее [4] исследования зависимости устойчивости решения задачи статики для одноярусной торовой ПК от числа разбиений при формировании расчетной сети показало, что устойчивое решение задачи обеспечивается при числе разбиений $N \geq 20...90$. Для рассматриваемой пневмоконструкции расчет велся для 70 элементов.

Изменения давления в каркасе ПА ΔP_p и внутри сферы ΔP_Q за время Δt вычисляются по формулам:

$$\Delta P_P = \frac{\left(Q_{QA} - Q_{PA} - Q_{PQ} - \rho \dot{W}_P\right)\gamma P_{P_0}}{\rho W_P}\Delta t, \tag{14}$$

$$\Delta P_Q = \frac{\left(Q_{PQ} - Q_{QA} - \rho \dot{W}_Q\right)\gamma P_{Q_0}}{\rho W_Q}\Delta t, \tag{15}$$

где P_{p_0} и P_{Q_0} – соответственно давления в пневмокаркасе ПА и внутри сферообразной полости, Q_{QA}, Q_{PA}, Q_{PQ} — величины расходов из сферической полости в атмосферу, из пневмокаркаса ПА в атмосферу и в полость соответственно. В данной задаче сферообразная оболочка считается замкнутой $Q_{QA},\ Q_{PA},\ Q_{PQ}=0$.

Объемы сферы W_Q и пневмокаркаса амортизатора W_P определяются следующим образом:

$$W_Q=\frac{\pi}{3}\sum_{i=1}^{id1}\left(x_j^2+x_{j-1}^2+x_j+x_{j-1}\right)\left(y_{j-1}+y_j\right), \qquad (16)$$

$$W_P=\frac{\pi}{3}\sum_{i=id2}^{N}\left(x_j^2+x_{j-1}^2+x_j+x_{j-1}\right)\left(y_{j-1}+y_j\right)-W_Q, \qquad (17)$$

где 1, $id1$ — номера элементов внутренней стенки пневмокаркаса ПА; $id2$, N — номера элементов внешней стенки.

3 Описание граничных условий

Особую сложность при решении задачи динамики формообразования ПА исследуемой конструкции представляет описание граничных условий в областях крепления ПК к корпусу СО, в зонах взаимодействия с посадочной поверхностью, а также на отдельных участках взаимодействия ПК между собой, что наблюдается при больших деформациях.

На оболочку ПА налагаются следующие граничные условия:

— на крепление ПА к СО:

$$\begin{array}{l} y_1=y_0,\ y_{81}=y_0,\ \dot y_1=v_{0_y},\ \dot y_{81}=v_{0_y},\\ v_1=0,\ v_{81}=0,\ \dot v_1=0,\ \dot v_{81}=0,\\ x_1=x_{0_1},\ x_{81}=x_{0_{81}},\ \dot x_1=x_0,\ \dot x_{81}=x_0;\\ u_1=x_{0_1},\ u_{81}=x_{0_{81}},\ \dot u_1=0,\ \dot u_{81}=0, \end{array} \qquad (18)$$

— на нижние точки внутренней и внешней оболочки сферы:

$$u_{36}=u_{36}^0,\ \ u_{46}=u_{46}^0. \qquad (19)$$

Граничные условия заданы так, что нижние точки могут двигаться только вертикально на выбранном расстоянии от центральной оси и соединены с круговыми мембранами, это позволяет избежать особенностей по широтным натяжениям, которые возникают на поверхности куполообразных осесимметричных оболочках [2], (на Рис. 1 в точках $j=36$ и $j=46$).

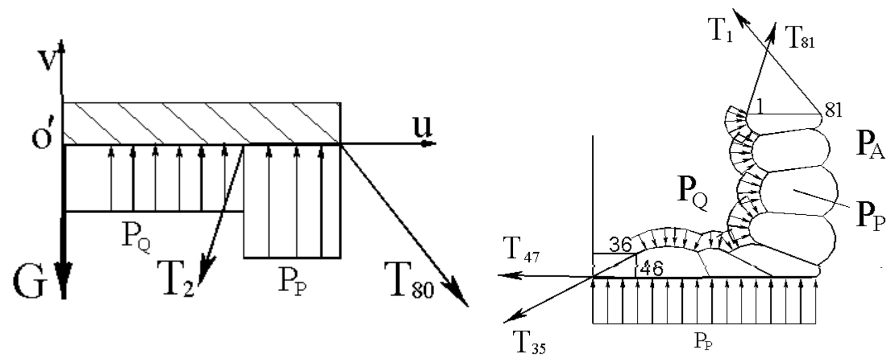

Рис. 5: Схема передачи упругих сил с ПА на корпус спускаемого объекта при посадке

При учете взаимодействия участков ПК между собой принимается допущение об отсутствии взаимного влияния соседних меридиональных сечений. Для учета взаимодействия участков ПК в меридиональном направлении используется проверка всех элементов расчетной сетки в радиальном сечении на непроникновение через каждый из элементов сети, описанная в [4]. При этом для каждого элемента вводится локальная система координат $O_1X^/Y^/$ и характерный параметр $\tilde{E}$, ограничивающий расстояние, на которое точка может приблизиться к отрезку.

При невыполнении условий на элемент по нормали действует некоторая штрафующая сила T_b, которая выталкивает точку за пределы отрезка. Поскольку для решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) используется метод Рунге-Кутта четвертого порядка, исходя из условия непрерывности четырех производных, штрафующая сила T_b задается как функция пятого порядка от величины относительного проникновения элемента.

$$\begin{aligned} T_b &= A\left|\frac{y_1' - \tilde{E}}{2\tilde{E}}\right| \quad \text{при } |y_t'| < \tilde{E}, \\ T_b &= 0 \qquad\qquad\quad \text{при } |y_t'| > \tilde{E}. \end{aligned} \tag{20}$$

Величина $\tilde{E}$ и коэффициент A подбираются из численного эксперимента так, чтобы исключить случаи проникновения элемента сквозь отрезок.

Решение задачи динамики формообразования ПК позволяет определить упругие силы, передающиеся на корпус спускаемого объекта

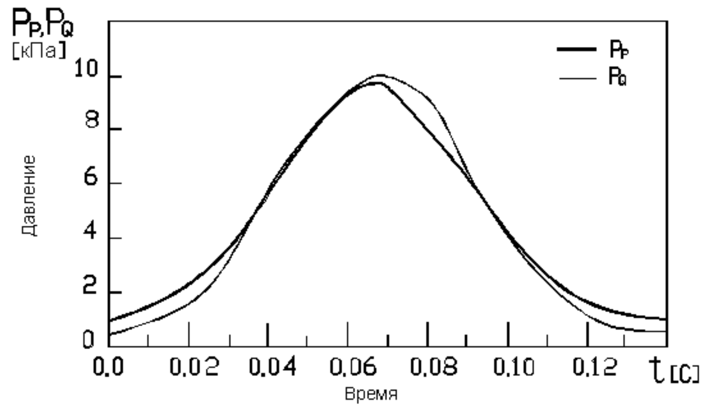

Рис. 6: Распределение давлений в пневмокаркасе и внутри оболочки при посадке объекта

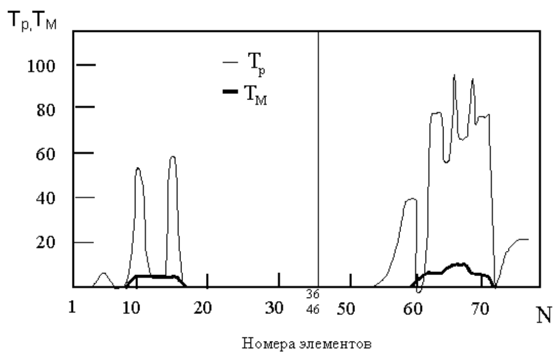

Рис. 7: Эпюры распределения натяжений в ПА при посадке

(Рис. 5). Они находятся из следующих соотношений:

$$F_{0_{iv}} = T_{1_{iv}} + T_{N-1_{iv}} + \sum_{i=1}^{n} \bar{T}s_{N-1_{iv}} + \sum_{j=k1}^{k2} \bar{R}_{i,j_v} + \bar{R}_{P_{iv}}, \qquad (21)$$

где $\bar{R}_{p_{iv}} = P_p \pi \left(u_{N-1}^2 - u_1^2\right)$ — силы давления от ПК, u_1, u_{N-1}, v_1, v_{N-1} — абсциссы и ординаты элементов крепления ПА в связанной системе координат; $\bar{T}_1$ — вектор погонных сил натяжения в точке $N-1$; $\bar{T}s_{N-1}$ — вектор силы натяжения i-й диафрагмы–стяжки, соприкасающейся с жестким корпусом; $\bar{R}_j$ — контактная сила давления, приложенная в точках поверхности ПА, прилегающих к жесткому корпусу объекта; $\bar{R}_p$ — сила давления в ПА, приложенная к объекту.

Определение НДС ПА в общем случае усложняется не только трудностями вычисления газодинамических нагрузок, но и быстрым формоизменением деформируемого пневмокаркаса, что приводит к соответствующим перераспределениям напряжений в элементах конструкции, достигающим больших величин, и возникновениям двухосных, одноосных и ненапряженных зон. Предложенная численная модель позволяет решить эту задачу для случая посадки СО со сферообразным ПУ с начальной поступательной скоростью V_0 на горизонтальную поверхность.

Система уравнений (1)–(3) с учетом граничных условий (18)–(19) решается методом Рунге-Кутта четвертого порядка. В качестве начальной формы ПК принимается равновесная форма при $P_Q = P_{Q_0}$ и $P_p = P_{p_0}$.

4 Пример

В качестве примера программной реализации описанного алгоритма, приводятся результаты исследования посадки СО массой $m_0 = 60$ кг, с вертикальной скоростью $V_y = 2$ м/с, снабженного сферообразным пневмокаркасным ПУ, который имеет размеры $R_s = 0,101$ м, $N_a = 0,22$ м и нагружен давлением $P_{p_0} = 10$ кПа и $P_{Q_0} = 5$ кПа при полном гашении скорости ; давление в каркасе, становится равным $P_{p_{max}} = 99,4$ кПа, $P_{Q_{max}} = 102$ кПа. Максимальная перегрузка, развиваемая при посадке объекта, $N_{y_{max}} = 7,9$.

Характер изменения давления в полостях сферообразной оболочки, отражает закон изменения давления в замкнутых полостях. Совпадение величины давлений, до и после обжатия (Рис. 6), подтверждает достоверность численного алгоритма расчета деформации и подтверждает точность вычисления интеграла, рассчитывающего объемы — W_P, W_Q и скорость изменения объемов — $\dot{W}_P$, $\dot{W}_Q$ для которых был применен метод среднеквадратичного сглаживания по четырем точкам. На Рис. 7 видно, что наибольшие натяжения в оболочке широтные T_p, и развиваются на элементах 8–12 внутренней поверхности сферы и 61–74 наружной поверхности. Меридиональные натяжения T_M значительно меньше и развиваются в этих же сечениях оболочки.

Исследование для других значений начальных давлений показывают, что оболочка меньше сминается возле точек закрепления. Нагрузки понижаются при условии, что давление в ПК больше чем давление в сферообразной оболочке.

Список литературы

[1] Проектирование спускаемых автоматических космических аппаратов / Под ред. В. М. Ковтуненко. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.

[2] Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции. М.: Стройиздат, 1967. С. 211–213.

[3] Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвиленева Н. Ю., Валиуллина Э. Э. Численное моделирование посадки спускаемых объектов с пневмоамортизатором // Актуальные проблемы авиадвигателестроения. Уфа: УГАТУ. 1998. С. 415–435.

[4] Комаров С. С., Цвиленева Н. Ю., Мискактин Н. И., Валиуллина Э. Э. Формообразование конусообразных торовых пневмоамортизаторов // Современные конструкции с применением мягких и гибких материалов. Владивосток: ДВГМА. 1992. С. 8–16.

[5] Комаров С. С., Цвиленева Н. Ю., Мискактин Н. И. Динамика формирования мягких конусообразных пневмокаркасных оболочек при взаимодействии с экраном // Проектирование и расчет конструкций из мягких оболочек. Владивосток: ДВГМА. 1994. С. 63–85.