УДК 533.6.013.42:518.12

ДИНАМИКА ДВУХСЛОЙНОЙ МЯГКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭКРАНОМ

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН*, Н. Ю. ЦВИЛЕНЕВА**

*Специальное конструкторское бюро авиационных устройств при УГАТУ
Тел: (3472) 23 77 71

**Факультет экономики, менеджмента и финансов УГАТУ,
Тел: (3472) 22 36 33 E-mail: root@cvilenevan.ugatu.ac.ru

Рассматривается ударное нагружение пневмокаркасной сферообразной оболочки, изготовленной из анизотропного материала и снабженной жестким цилиндрическим донышком. Строится математическая модель упругой деформации системы «мягкая оболочка–жесткое донышко» и предложен численный алгоритм расчета ударного взаимодействия сферообразной оболочки с экраном. Оценено влияние угла раскрытия сферы, погонного модуля упругости и скорости нагружения системы на НДС пневмоконструкции

Пневмоконструкция; погонный модуль упругости; мягкая анизотропная оболочка; натяжения; давление; угол раскрытия сферы; экран; напряженно-деформированное состояние

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью пневмоконструкций (ПК) является их способность к большим перемещениям, что, с одной стороны, ведет к значительному изменению сил и моментов, действующих на сопряженные с мягкооболочечными конструкциями жесткие элементы и тела, а с другой стороны, ведет к колоссальному усложнению расчетов подобных конструкций.

Трудность построения математических моделей обусловлена существованием нелинейной связи между усилиями и деформациями (физическая нелинейность), деформациями и перемещениями (геометрическая нелинейность), а также тем, что материал ПК не воспринимает сжимающих усилий, в связи с чем при сложном нагружении в них могут существовать области как одноосного, так и двухосного напряженного состояния. Поэтому теоретические исследования мягкооболочечных конструкций возможны лишь на основе численных методов с использованием ЭВМ.

Известны исследования [1], в которых рассматривается напряженно-деформированное состояние сферических однослойных мягких оболочек при статическом осесимметричном нагружении и дано аналитическое решение задачи.

В работе [2] авторами предложены математическая модель и численный алгоритм расчета упругой деформации конусообразной мягкой оболочки, в которой поверхность представляется в виде ортогональной сетки расчетных элементов.

В предлагаемом исследовании рассматривается ударное нагружение пневмокаркасной сферообразной оболочки, изготовленной из анизотропного материала и снабженной жестким цилиндрическим донышком.

1. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МЯГКОЙ ОБОЛОЧКИ

Математическая модель динамики мягкой двухслойной оболочки при ударном взаимодействии с экраном включает уравнения движения жесткого донышка и уравнения движения деформируемой мягкой оболочки.

Движение мягкой оболочки с жестким донышком описывается в неподвижной системе координат Oxy, относительное движение мягкой оболочки записывается в подвижной системе координат Ouv, связанной с жестким донышком (рис. 1).

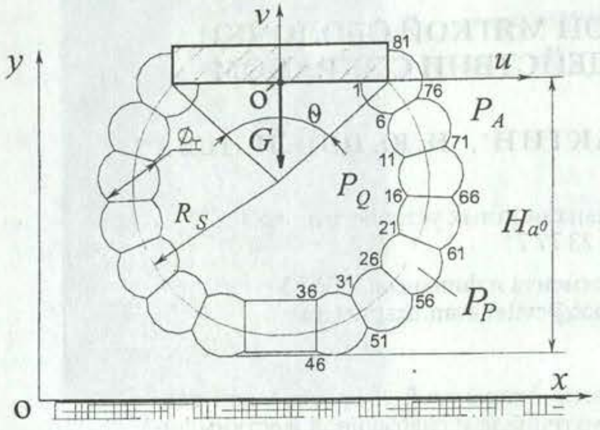

Рис. 1. Системы координат, принятые при построении модели

Уравнения движения системы «твердое тело–мягкая оболочка» в плоскости вращения жесткого донышка запишутся в виде

$$\begin{aligned}
&m_o\dot{V}_o = R_P + R_C + m_o g;\\
&J_o\dot{\omega} = M_p + M_C;\\
&\sigma\ddot{\bar{r}} = \operatorname{div} T + p + \sigma g;\\
&\dot{P}_i = \frac{\gamma P_i}{\rho_i W_i}\left(\sum_k Q_{ik} - \rho_i\dot{W}_i\right),
\end{aligned}\qquad (1)$$

где m_o — масса жесткого донышка; J_o — момент инерции донышка относительно центра масс; V_o — вектор абсолютной скорости донышка; ω — вектор угловой скорости вращения донышка; R_P, M_P — силы и момент сил давления газа; R_C, M_C — силы и момент сил реакции оболочки на донышко; σ — поверхностная плотность материала оболочки; T — тензор мембранных усилий; p — плотность поверхностной нагрузки от сил давления газа; g — ускорение свободного падения; Q_{ik} — массовый расход газа из i-й полости оболочки в k-ю полость; W_i — объем; γ — показатель адиабаты; P_i, ρ_i — давление и плотность рабочего тела в i-м отсеке мягкой оболочки.

Первое и второе уравнения системы (3) описывают плоское движение жесткого донышка, третье уравнение — движение мягкой оболочки, четвертое — закон изменения давления в отсеках пневмоконструкции при её контактной деформации об экран и донышко.

2. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МЯГКОЙ ОБОЛОЧКИ

Уравнения движения мягкой оболочки записываются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения дискретных элементов.

При численном моделировании движения оболочки на поверхность оболочки наносится ортогональная сетка лагранжевой системы координат, которая разбивает ее на $N \times m$ четырехугольных конечных элементов. Масса элементов считается сосредоточенной в их центре. При этом для описания динамики оболочки используются только уравнения движения выделенных дискретных элементов.

Тензор мембранных усилий будет содержать нулевые недиагональные компоненты. Если выбрать за основные направления меридиональные и широтные линии на поверхности сферообразной оболочки, то движение элемента в глобальной эйлеровой системе координат OUV можно представить под действием сил давления и разности меридиональных натяжений в оболочке в виде:

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

где $\ddot{u}_{ij}$, $\ddot{v}_{ij}$, $\dot{u}_{ij}$, $\dot{v}_{ij}$ — соответственно проекции ускорений и скоростей j-го элемента в i-м выбранном меридиональном сечении в системе координат Ouv; $\dot{y}$ — вертикальная проекция скорости донышка в системе координат Oxy; C_a — коэффициент демпфирования по абсолютной скорости элементов; C_r — коэффициент демпфирования по скорости относительного движения соседних элементов каркаса друг относительно друга, который вводится для исключения высокочастотных счетных осцилляций элементов (коэффициент диссипации энергии в ткани); $m_j = \sigma s_j$ — масса выделенного элемента площади s_j.

Силы, действующие на j-й элемент, равны

$$\begin{aligned}
\bar{F}_{ij}(u,v) = \bar{T}_{M_{ij+1}} + \bar{T}_{M_{ij-1}} + \bar{T}_{P_{i+1,j}} + \\
+ \bar{T}_{P_{i-1,j}} + \bar{P}_{ij} + \bar{F}_{N_{ij}} + \bar{T}_{B_{ij}},
\end{aligned}\qquad (3)$$

где $\bar{T}_{M_{ij+1}}$, $\bar{T}_{M_{ij-1}}$ — меридиональные силы натяжения, действующие на j-й элемент со стороны $(j+1)$-го и $(j-1)$-го элементов; $\bar{T}_{P_{i+1,j}}$, $\bar{T}_{P_{i-1,j}}$ — широтные натяжения, зависящие от радиального перемещения элемента; $\bar{P}_j$ — сила давления газа на поверхность

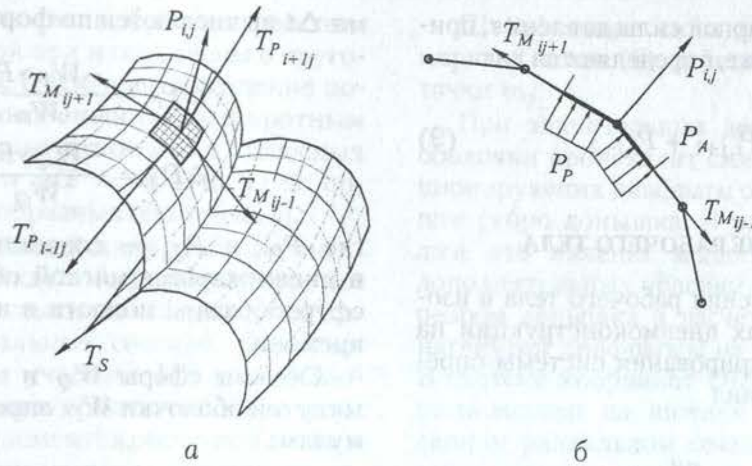

Рис. 2. Схема действия сил, приложенных к элементу оболочки: a – фрагмент оболочки и конечный элемент с приложенными к нему силами; б – плоскость i-го меридионального сечения

элемента; $\bar{F}_{N_{ij}}$ — нормальная сила при взаимодействии j-го элемента с экраном; $\bar{T}_{B_{ij}}$ — штрафующие силы при взаимном проникновении элементов оболочки.

Меридиональные и широтные натяжения определяются по соответствующим погонным усилиям (рис. 2, a):

$$
\begin{aligned}
T_{M_{i,j+1}} &= \frac{1}{2} t_{M_{i,j+1}} \left(l_{P_{i+1,j+1}} + l_{P_{i-1,j+1}} \right); \\
T_{M_{i,j-1}} &= \frac{1}{2} t_{M_{i,j-1}} \left(l_{P_{i+1,j-1}} + l_{P_{i-1,j-1}} \right); \\
T_{P_{i+1,j}} &= \frac{1}{2} t_{P_{i+1,j}} \left(l_{i+1,j+1} + l_{i+1,j-1} \right); \\
T_{P_{i-1,j}} &= \frac{1}{2} t_{P_{i-1,j}} \left(l_{i-1,j+1} + l_{i-1,j-1} \right),
\end{aligned}
\tag{4}
$$

где $l_{P_{i+1,j+1}}$, $l_{P_{i-1,j+1}}$, $l_{P_{i+1,j-1}}$, $l_{P_{i-1,j-1}}$, $l_{i+1,j+1}$, $l_{i+1,j-1}$, $l_{i-1,j+1}$, $l_{i-1,j-1}$ — линейные размеры конечных элементов в широтном (l_P) и меридиональном (l) направлениях.

Силы $T_{S_{i,j_k}}$, развивающиеся на диафрагмах в радиальном направлении, также вычисляются по погонным усилиям

$$
T_{S_{i,j_k}} = \frac{1}{2} t_{S_{i,j_k}} \left(l_{P_{i,j_k}} + l_{P_{i,j_l}} \right). \tag{5}
$$

Погонные усилия могут быть связаны с деформацией элементов сетки любым законом. В данной работе принят нелинейный закон

$$
t_j = E_j \left(\varepsilon_j \right) \varepsilon_j, \tag{6}
$$

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

Для моделирования взаимодействия пневмоконструкции с экраном вводится нормальная сила F_N, действующая на точки контактирующего участка мягкой оболочки. Она задается в виде функции 5-го порядка от величины «проникновения» элемента в экран:

$$
F_{N_{v_{i,j}}} = \begin{cases} 0 & \text{при } \xi_{i,j} \le 0; \\ \xi_{i,j}^5 - \phi_{v_{i,j}} & \text{при } \xi_{i,j} > 0, \end{cases} \tag{7}
$$

где $\phi_{v_{i,j}} = 0{,}1 \left(\dot{v}_{i,j} + \dot{y} \right)$ – демпфирующая сила; $\xi_{i,j} = v_k - v_{i,j}$; v_k – координата, характеризующая расстояние до экрана в подвижной системе координат, связанной с донышком.

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, который делится пополам, и приложенной на концах отрезков (рис. 2, б):

$$
\begin{aligned}
P_{i,j+1} &= \frac{1}{2} \Delta P \left(l_{P_{i+1,j+1}} + l_{P_{i-1,j+1}} \right) l_{i,j+1}; \\
P_{i,j-1} &= \frac{1}{2} \Delta P \left(l_{P_{i+1,j-1}} + l_{P_{i-1,j-1}} \right) l_{i,j-1},
\end{aligned}
\tag{8}
$$

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

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

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

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

$$\bar{P}_{i,j} = \bar{P}_{i,j+1} + \bar{P}_{i,j-1}. \qquad (9)$$

3. ДАВЛЕНИЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Изменение давления рабочего тела в изолированных отсеках пневмоконструкции на каждом шаге интегрирования системы определяется из уравнения

$$\frac{dP_k}{dt} = \frac{-\frac{dW_k}{dt}\gamma P_k}{W_k}, \qquad (10)$$

где k – номер отсека.

Описанная выше расчетная сетка накладывается на пневмокаркас конструкции в предположении, что его начальная и раскройная формы совпадают. Узловым точкам присваиваются значения $u_{o_{i,j}}$, $v_{o_{i,j}}$, полученные из вычислительной программы генерации формы на основе теоретического чертежа мягкой оболочки [3]. Перед началом расчета динамики ударного взаимодействия определяется форма оболочки при нагружении её начальным давлением P_{Q_o}, P_{P_o}, при этом задача статики решается методом динамического установления, пока силы давления газа не уравновесятся натяжением оболочки, развиваемым в местах её закрепления.

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. В зависимости от скорости движения и степени взаимодействия оболочки с твердыми границами этот шаг делится на целочисленный коэффициент в пределах от 4 до 12.

Проведенные ранее [3] исследования зависимости устойчивости решения задачи статики при расчете упругой деформации одноярусной торовой пневмоконструкции от числа разбиений в меридиональном сечении при формировании расчетной сетки показали, что устойчивое решение задачи обеспечивается при числе разбиений $N = 40\ldots80$. Для рассматриваемой пневмоконструкции расчет велся для 70 элементов.

Изменения давления в каркасе мягкой оболочки ΔP_P и внутри сферы ΔP_Q за время Δt вычисляются по формулам:

$$\Delta P_P = \frac{-\dot{W}_P\gamma P_{P_0}}{W_P}\Delta t, \qquad (11)$$

$$\Delta P_Q = \frac{-\dot{W}_Q\gamma P_{Q_0}}{W_Q}\Delta t, \qquad (12)$$

где P_{P_0} и P_{Q_0} – соответственно давления в пневмокаркасе мягкой оболочки и внутри сферообразной полости в начальный момент времени.

Объемы сферы W_Q и пневмокаркаса замкнутой оболочки W_P определяются по формулам:

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

$$W_P = \frac{\pi}{3}\sum_{i=id2}^{N}\left(x_j^2 + x_{j-1}^2 + x_j + x_{j-1}\right) \times \times \left(y_{j-1} + y_j\right) \quad W_Q, \qquad (13)$$

где $1,\ldots,id1$ – номера элементов внутренней стенки пневмокаркаса мягкой оболочки; $id2,\ldots,N$ – номера элементов внешней стенки.

4. ОПИСАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Особую сложность при решении задач динамики формообразования мягких оболочек представляет описание граничных условий в областях крепления пневмоконструкции к жесткому донышку и условия взаимодействия с экраном, а также взаимодействия отдельных участков ПК между собой, что наблюдается при больших деформациях.

На мягкую оболочку налагаются следующие граничные условия:

– в местах крепления оболочки к жесткому донышку

$$\begin{array}{llll} y_1 = y_o; & y_{81} = y_o; & \dot{y}_1 = V_{o_y}; & \dot{y}_{81} = V_{o_y}; \\ v_1 = 0; & v_{81} = 0; & \dot{v}_1 = 0; & \dot{v}_{81} = 0; \\ x_1 = x_{o_1}; & x_{81} = x_{o_{81}}; & \dot{x}_1 = 0; & \dot{x}_{81} = 0; \\ u_1 = x_{o_1}; & u_{81} = x_{o_{81}}; & \dot{u}_1 = 0; & \dot{u}_{81} = 0; \end{array} \qquad (14)$$

– в нижних точках внутренней и внешней оболочки сферы

$$u_{36} = u_{36}^0; \qquad u_{46} = u_{46}^0. \qquad (15)$$

Граничные условия предполагают, что нижние точки оболочки могут двигаться только вертикально на выбранном расстоянии от центральной оси и соединены с круговыми мембранами. Последнее допущение позволяет избежать особенностей по широтным натяжениям, которые возникают в полюсных точках $jd1 = 36$ и $jd2 = 46$ (рис. 1) на поверхности куполообразных оболочек [1].

При учете взаимодействия участков пневмоконструкции между собой принимается допущение об отсутствии взаимодействия соседних меридиональных сечений. Для учета взаимодействия участков ПК в меридиональном направлении используется процедура проверки всех элементов расчетной сетки в радиальном сечении на непроникновение через каждый из элементов сети, описанная в [3]. 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 вышеуказанных условий на элемент по нормали действует некоторая штрафующая сила, которая выталкивает точку за пределы отрезка. Поскольку для решения системы дифференциальных уравнений (3), используется метод Рунге–Кутта четвертого порядка, то, исходя из условия непрерывности четырех производных, штрафующая сила T_B задается как функция пятого порядка от величины относительного проникновения выделенного элемента:

$$T_{\text{B}} = \begin{cases} A\left|\frac{y_1'-\tilde{E}}{2\tilde{E}}\right|^5, & \text{при } |y_1'| < \tilde{E}, \\ 0, & \text{при } |y_1'| \geq \tilde{E}. \end{cases} \tag{16}$$

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

Аналогично вводятся штрафующие силы для элементов, оказавшихся вблизи границы твердого тела. Эти силы пропорциональны $\left|\bar{r}'_j - \bar{r}'_d\right|$, где $\bar{r}'_j$, $\bar{r}'_d$ — радиус-векторы, соединяющие центр j-го элемента и ближайшую точку, принадлежащую твердому телу, $\bar{r}'_j \in \Omega_d$. Условие, обеспечивающее непроникновение элементов мягкой оболочки в жесткое донышко, выглядит так:

$$\bar{T}_e = \begin{cases} A\left(\bar{r}'_j - \bar{r}'_d\right), & \text{при } \bar{r}'_j \in \Omega_d; \\ 0, & \text{при } \bar{r}'_j \notin \Omega_d. \end{cases} \tag{17}$$

Штрафующие силы добавляются к суммарным силам (6), действующим на узловые точки m_j.

При значительных деформациях мягкой оболочки происходит смятие кольцевых секционирующих диафрагм о нижнее выступающее ребро донышка. В рассматриваемой задаче это явление моделируется введением дополнительных условий перегиба диафрагм ребром донышка и расчетом силы действия натянутой диафрагмы на ;жесткое донышко. В системе координат OUV, начало которой расположено на нижнем ребре донышка в данном радиальном сечении, условием контакта донышка с диафрагмой является величина угла между радиус-векторами узловых точек k-й диафрагмы $k1$ и $k2$, который становится больше $\varphi > \pi$:

$$T_{S_{ij}}^k = \begin{cases} E\left(|\bar{r}_{k1}| + |\bar{r}_{k2}| - d_k\right), \\ \quad \text{если } \sin\varphi < 0, \\ \quad \text{и } |\bar{r}_{k1}| + |\bar{r}_{k2}| > d_k; \\ 0, \quad \text{если } \sin\varphi \geq 0 \\ \quad \text{или } |\bar{r}_{k1}| + |\bar{r}_{k2}| \leq d_k, \end{cases} \tag{18}$$

где

$$\sin\varphi = \frac{\bar{r}_{k1} \times \bar{r}_{k2}}{|\bar{r}_{k1}|\,|\bar{r}_{k2}|}.$$

Проекции этой силы равны соответственно:

$$\begin{aligned} T_{S_{Vij}}^k &= T_{S_{ij}}^k \frac{r_{k1_V}}{|\bar{r}_{k1}|} + T_{S_{ij}}^k \frac{r_{k2_V}}{|\bar{r}_{k2}|}; \\ T_{S_{Uij}}^k &= T_{S_{ij}}^k \frac{r_{k1_U}}{|\bar{r}_{k1}|} + T_{S_{ij}}^k \frac{r_{k2_U}}{|\bar{r}_{k2}|}. \end{aligned} \tag{19}$$

Решение задачи динамики формообразования пневмоконструкции позволяет определить упругие силы, передающиеся в вертикальном направлении на твердое тело. Они находятся из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} F_{o_{i_v}} = T_{2_{i_v}} + T_{N-1_{i_v}} + \\ + \sum_{k-1}^{K} T_{S_{N_{i_v}}^k} + \sum_{j=k1}^{k2} R_{i,j_v} + R_{P_{i_v}}, \end{aligned} \tag{20}$$

где $R_{P_{i_v}} = P_P\pi\left(u_N^2 - u_1^2\right)$ — силы давления от ПК, u_1, u_N, v_1, v_N — абсциссы и ординаты элементов крепления оболочки в связанной системе координат; $\bar{T}_2$, $\bar{T}_{N-1}$ — векторы погонных сил натяжения в элементах 1 и N от элементов 2 и $(N-1)$; $\bar{T}_{S_N}^k$ — вектор силы натяжения k-й диафрагмы-стяжки в случае соприкосновения с жестким донышком;

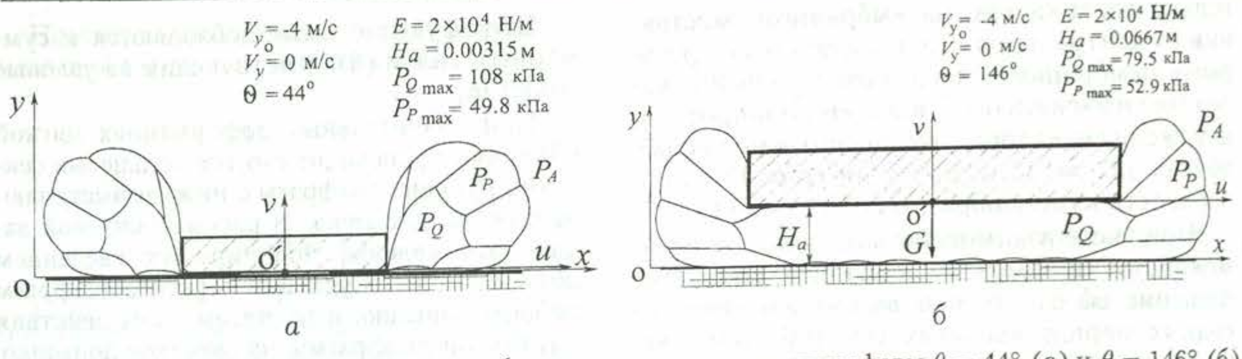

Рис. 3. Формообразование исследуемых оболочек при угле раскрытия сферы $\theta = 44°$ (*а*) и $\theta = 146°$ (б)

$\bar{R}_j$ — контактная сила давления, приложенная в точках поверхности оболочки, прилегающих к жесткому донышку; $\bar{R}_P$ — сила от давления в мягкой оболочке, приложенная к донышку.

Определение НДС мягкой оболочки в общем случае усложняется не только трудностями вычисления газодинамических нагрузок, но и быстрым формоизменением деформируемого пневмокаркаса, что приводит к соответствующему перераспределению напряжений в элементах конструкции, достигающих больших величин.

Система уравнений (3)–(5) с учетом граничных условий (14)–(15) решается методом Рунге–Кутта четвертого порядка. В качестве начальной формы ПК принимается равновесная форма при $P_Q = P_{Q_o}$ и $P_P = P_{P_o}$.

5. ПРИМЕР

В качестве примера программной реализации описанной задачи приводятся результаты исследования ударного взаимодействия с экраном системы «твердое тело–мягкая оболочка» с различным углом раскрытия сферы θ, массой $m_o = 100$ кг, с вертикальной скоростью $V_{y_o} = -4$ м/с, снабженной сферообразной двухслойной пневмокаркасной мягкой оболочкой, которая имеет размеры $R_S = 0{,}190$ м, $H_A = 0{,}420 \div 0{,}290$ м; $\theta_1 = 44°$, $\theta_2 = 146°$ и нагружена давлениями в сфере и пневмокаркасе $P_{Q_o} = 0{,}5$ кПа и $P_{P_o} = 10$ кПа. Формообразование мягкой оболочки с жестким донышком при ударном взаимодействии с экраном приведено на рис. 3. Изменение объема сферы для $\theta = \text{var}$ пропорционально степени обжатия ПК, при этом влияние погонного модуля упругости незначительно и составляет ~ 10 %.

Влияние схемы заделки жесткого донышка мягкой сферообразной оболочки на НДС системы показано на рис. 4.

Видно, что преобладающими натяжениями, которые реализуются при ударном взаимодействии системы с экраном, являются широтные. Последние принимают максимальные значения в элементах $N = 10\ldots20$ на внутренней и в элементах $N = 50\ldots60$ на внешней поверхности сферообразных оболочек. Меридиональные натяжения более ярко проявляются в оболочках с углом раскрытия сферы $\theta_1 = 44°$, причём наибольшие значе-

Рис. 4. Эпюры распределения натяжений по сечению оболочки

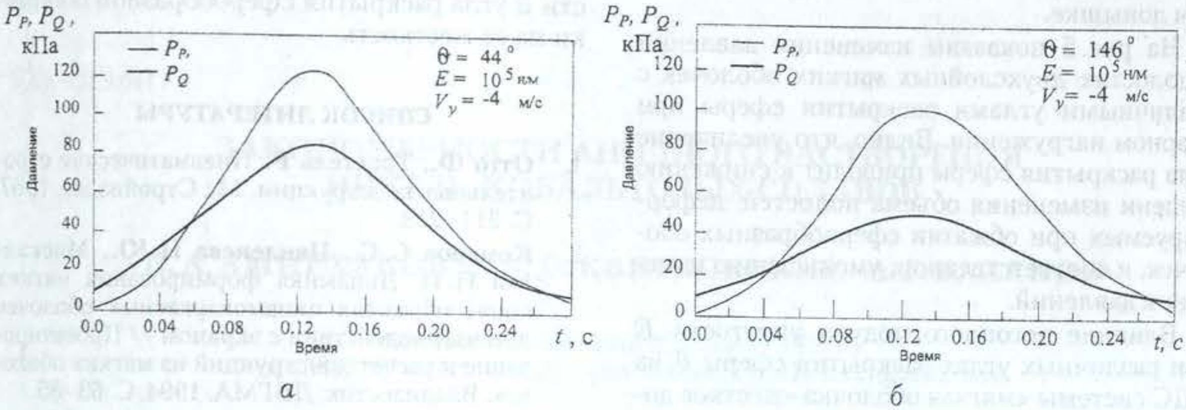

Рис. 5. Изменение давления в полостях оболочки при ударном взаимодействии с экраном для оболочки с углом раскрытия сферы $\theta = 44°$ (*а*) и $\theta = 146°$ (*б*)

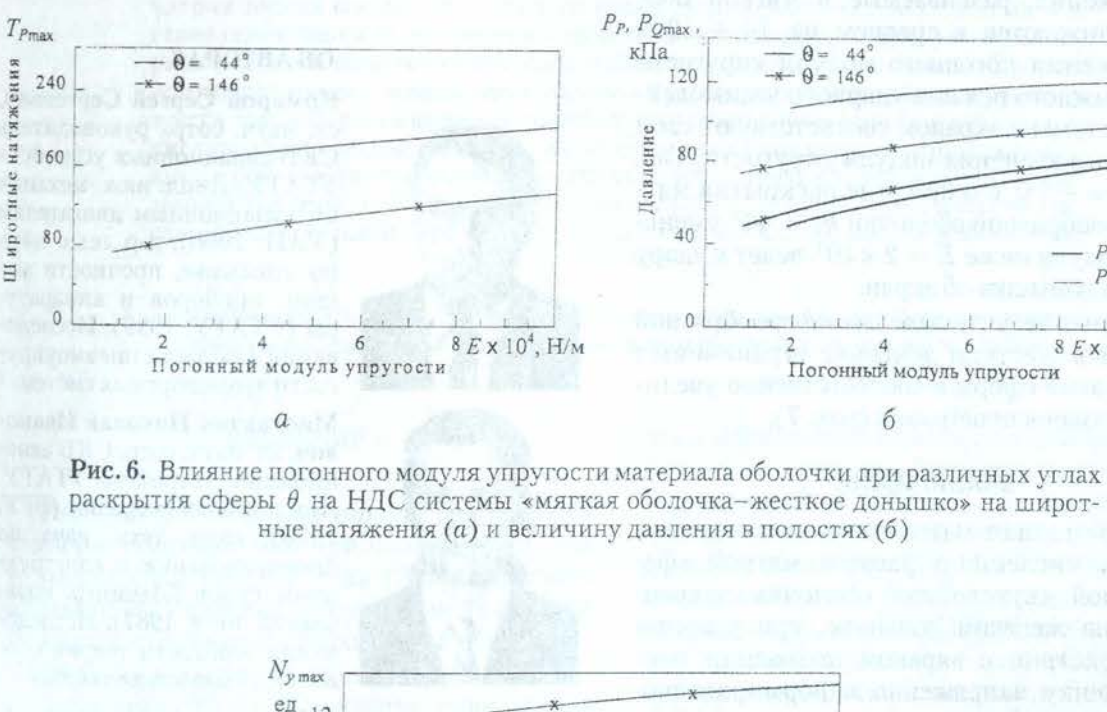

Рис. 6. Влияние погонного модуля упругости материала оболочки при различных углах раскрытия сферы θ на НДС системы «мягкая оболочка–жесткое донышко» на широтные натяжения (*а*) и величину давления в полостях (*б*)

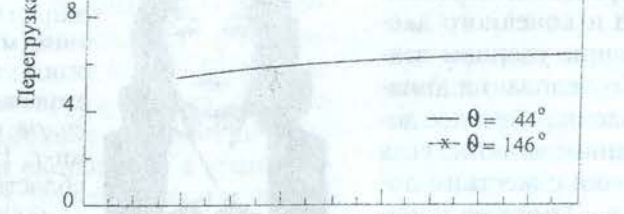

Рис. 7. Влияние погонного модуля упругости материала оболочки на уровень перегрузок

ния наблюдаются в заделке оболочки на жестком донышке.

На рис. 5 показаны изменения давлений в полостях двухслойных мягких оболочек с различными углами раскрытия сферы при ударном нагружении. Видно, что увеличение угла раскрытия сферы приводит к снижению степени изменения объема полостей, деформируемых при обжатии сферообразных оболочек, и соответственно к уменьшению изменения давлений.

Влияние погонного модуля упругости E при различных углах раскрытия сферы θ на НДС системы «мягкая оболочка–жесткое донышко» приведено на рис. 6. Видно, что увеличение угла раскрытия мягкой сферообразной оболочки с $\theta_1 = 44°$ до $\theta_2 = 146°$ снижает в 2 раза уровень максимальных натяжений $T^i_{\max}$ в оболочке.

Натяжения, развиваемые в мягкой оболочке, снижаются в среднем на $10 \div 12\,\%$ при снижении погонного модуля упругости E. Для каждого режима ударного взаимодействия системы с экраном соответствуют свои предельные значения модуля упругости. Так, при $V_{y_0} = -4$ м/с и при угле раскрытия мягкой сферообразной оболочки $\theta_1 = 44°$ уменьшение модуля ниже $E = 2 \times 10^4$ ведет к удару жесткого донышка об экран.

Увеличение угла заделки сферообразной оболочки в жестком донышке ограничивает путь обжатия сферы и соответственно увеличивает уровень перегрузки (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель и алгоритм численного расчета мягкой сферообразной двухслойной оболочки, закрепленной на жестком донышке, при ударном взаимодействии с экраном позволили провести оценку напряженно-деформированного состояния оболочки при различных режимах нагружения. Адекватность описываемых моделью процессов подтверждается совпадением значений начального и конечного давлений в мягкой оболочке при ударном взаимодействии с экраном. Исследования динамики системы «мягкая оболочка–жесткое донышко» показали существенное влияние угла закрепления мягкой оболочки с жестким донышком на НДС оболочки. Отмечена идентичность влияния погонного модуля упругости и угла раскрытия сферообразной оболочки на ее жесткость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Отто Ф., Тростель Р.** Пневматические строительные конструкции. М.: Стройиздат, 1967. С. 211–213.
2. **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.
3. **Комаров С. С., Цвиленева Н. Ю., Мискактин Н. И.** Формообразование конусообразных торовых пневмоамортизаторов // Современные конструкции с применением мягких и гибких материалов. Владивосток: ДВГМА, 1992. С. 8–16.

ОБ АВТОРАХ

Комаров Сергей Сергеевич, ст. науч. сотр., руководитель СКБ авиационных устройств УГАТУ. Дипл. инж.-механик по авиационным двигателям (УАИ, 1966), д-р техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 1999). Исследования в области пневмоупругости транспортных систем.

Мискактин 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.

Цвиленева Нина Юрьевна, доц. каф. безопасности производства и промышленной экологии УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1971), канд. техн. наук по проектированию и конструкциям судов (Ленингр. кораблестр. ин-т, 1985). Исследования в области моделирования динамики пневмоконструкций.