

УДК 533.6.013.42:518.12

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН, В. Ф. ЮДИН

## УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭКРАНОМ НАДУВНЫХ СФЕРООБРАЗНЫХ НЕЗАМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК

Рассматривается ударное нагружение системы, включающей твердое тело и навешенную к нему снизу незамкнутую сферообразную пневмокаркасную оболочку, изготовленную из низко модульной ткани. Построена математическая модель упругой деформации системы «твердое тело–мягкая оболочка» и предложен численный алгоритм расчета динамического взаимодействия незамкнутой сферообразной мягкой оболочки с экраном. Объяснен механизм возникновения эффекта авторегулирования давления в подкупольной полости незамкнутой сферообразной оболочки при динамическом взаимодействии с экраном. Пневмоконструкция; погонный модуль упругости; угол раскрытия сферы; уровень перегрузки; напряженно-деформированное состояние

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования, проведенные авторами ранее [1, 2], выявили, что при динамическом взаимодействии с экраном конусообразных мягких оболочек наблюдается эффект авторегулирования давления в подкупольной полости. Цель данного исследования показать, что действие указанного эффекта распространяется и на незамкнутые сферообразные мягкие оболочки с произвольным углом раскрытия сферы.

### 1. МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ТВЕРДОЕ ТЕЛО–МЯГКАЯ ОБОЛОЧКА» С ЭКРАНОМ

Математическая модель динамического нагружения упругой мягкой оболочки в системе «твердое тело–мягкая оболочка» при взаимодействии с экраном включает уравнения движения твердого тела и мягкой упругой оболочки, а также уравнения состояния газа в отсеках этой оболочки. Газ считается идеальным и сжимаемым по адиабатическому закону.

При решении задачи динамического взаимодействия системы «твердое тело–мягкая оболочка» используются две системы координат: подвижная система координат  $Ouv$ , связанная с нижней плоскостью твердого тела (рис. 1), и неподвижная система  $Oxy$ , связанная с поверхностью экрана.

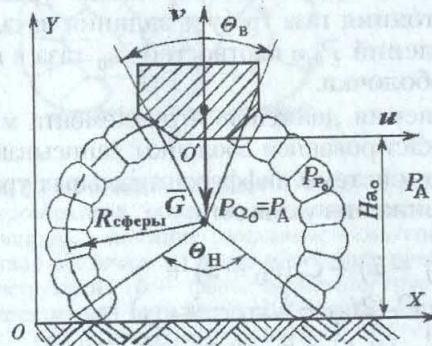


Рис. 1. Системы координат, принятые при построении модели

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{R}} &= \frac{1}{M_O} (\vec{F}_P + \vec{F}_C) + \vec{g}; \\ \dot{\vec{K}} &= \vec{M}_P + \vec{M}_C; \\ \ddot{\vec{r}} &= \frac{1}{\sigma} (\nabla T + \vec{P} + \vec{F}_G); \\ \dot{P}_i &= \frac{\gamma P_i}{\rho_i W_i} \left( \sum_k Q_{ik} - \rho_i W_i \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M_O$  – масса твердого тела;  $\sigma$  – поверхностная плотность материала оболочки;  $\vec{K}$  – кинетический момент тела;  $\vec{R}$  – вектор положения центра масс тела; диус-вектор, описывающий поверхность оболочки;  $P_i, \rho_i$  – давление и плотность газа  $i$ -м отсека мягкой оболочки;  $Q_{ik}$  – массовый расход воздуха из  $i$ -й полости оболочки объема  $W_i$  в  $k$ -ю полость;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $F_C, M_C$  – силы и моменты реакции оболочки в местах крепления оболочки к

твердому телу;  $T$  — тензор мембранных усилий;  $p$  — плотность поверхностной нагрузки от сил давления;  $F_G$  — силы воздействия окружающих тел и других элементов оболочки;  $F_P, M_P$  — поверхностные силы и момент силы давления газа на твердое тело;  $W_i$  — объем  $i$ -й полости;  $g$  — ускорение свободного падения.

Первое и второе уравнения системы (1) описывают поступательное и вращательное движения твердого тела в неподвижной системе координат, третье уравнение — поступательное движение мягкой оболочки в связанной с телом системе координат. Четвертое уравнение описывает закон изменения объемов рабочего тела в деформируемых полостях каркасированной мягкой оболочки.

Уравнения движения твердого тела интегрируются при наложении начальных условий на его положение в пространстве  $\vec{R}_0, \vec{\varphi}_0$  и скорости,  $\vec{V}_0, \vec{\omega}_0$ . Интегрирование уравнений состояния газа требует задания начальных давлений  $P_{i0}$  и плотностей  $\rho_{i0}$  газа в полостях оболочки.

Уравнения движения  $i$ -го элемента мягкой каркасированной оболочки записываются в виде системы дифференциальных уравнений движения узлов сети:

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

где  $\ddot{u}_{ij}, \ddot{v}_{ij}, \dot{u}_{ij}, \dot{v}_{ij}$  — соответственно проекции ускорений и скоростей  $i$ -й точки  $j$ -го сечения мягкой оболочки в системе координат  $Ouv$ ;  $\ddot{x}, \ddot{y}, \dot{x}, \dot{y}$  — проекции ускорения и скорости тела в системе координат  $Oxy$ , причем ось  $Oy$  совпадает по направлению с осью  $Ou$ ;  $C_a$  — 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 ткани);  $m_{ij}$  — масса выделенного элемента каркасированной мягкой оболочки, причем  $m_{ij} = M/N$ , где  $M$  — масса оболочки,  $N$  — число узлов;  $T_{u_{ij}}, T_{v_{ij}}$  — система упругих сил, возникающих в оболочке при деформации под действием внешних сил;  $P_{u_{ij}}(u, v)$  — силы давления газа на поверхность элемента;  $F_{u_{ij}}(u, v)$  — система

внешних сил от взаимодействия элемента с поверхностью твердых тел и других элементов оболочки. Уравнение динамики оболочки является уравнением в частных производных и, помимо задания начальной формы, требует задания граничных условий в узлах крепления мягкой оболочки с твердым телом.

Рассматриваемая пневмоконструкция при обжатии обволакивает нижнюю часть твердого тела в зоне закрепления таким образом, что на поверхности тела происходит наложение как внутренней и внешней оболочек, так и секционирующих перегородок. При этом должны выполняться условия непроницаемости каждой из мягких оболочек сформированного таким образом пакета с твердым телом. Заметим, что каждая из мягких оболочек в пакете должна сохранять возможность самостоятельного движения (проскальзывания) по направлению образующей твердого тела относительно других оболочек и самого тела.

Поэтому особую сложность при решении задачи динамики формообразования мягкой сферообразной оболочки представляет описание граничных условий в областях крепления каркасированной оболочки к твердому телу, взаимодействия с экраном, а также взаимодействия отдельных участков оболочки между собой, что наблюдается при больших деформациях. При неподвижном закреплении оболочки на твердом теле координаты и скорости точек мягкой оболочки, расположенные на контуре  $\Omega$ , совпадают с координатами и скоростями контура  $\Gamma$  твердого тела, к которому прикрепленна оболочка пневмоконструкции:

$$r_\Omega = r_\Gamma; \quad (3)$$

$$\dot{r}_\Omega = \dot{r}_\Gamma. \quad (4)$$

При интегрировании уравнений движения упругой оболочки ее поверхность внутри граничного контура  $\Omega$  разбивается на отдельные малые элементы. Разбиение осуществляется с использованием ортогональной сетки, направленной по меридиональным и широтным направлениям.

При учете взаимодействия участков мягкой оболочки между собой принимается допущение об отсутствии взаимодействия соседних меридиональных сечений. Для учета взаимодействия участков оболочки в меридиональном направлении используется процедура проверки всех точек расчетной сетки в радиальном сечении на непроницаемость через каждый из элементов сети, описанная в [1]. При нарушении условия непроницае-

ния на точку по нормали действует некоторая штрафующая сила  $\bar{T}_{ij}(u, v)$ , которая выталкивает точку за пределы отрезка или удаляет ее от элемента на расстояние  $d > E$ .

Взаимодействие мягкой каркасированной оболочки с экраном моделируется введением нормальной силы  $\bar{F}_{Nij}(u, v)$ , действующей на точки контактирующего участка оболочки, которая задается в виде функции 5-го порядка от величины «проникновения» точки в экран  $\delta = (E - d)$ . Силы давления  $\bar{P}_{ij}$  представляются как результирующие сил давления, действующих на элемент сетки, охватывающей  $(i, j)$ -й отрезок. В разработанной модели упругой деформации пневмоконструкции материал оболочки считается ортогонально изотропным, а главные напряжения и деформации в нем связаны законом Гука.

Деформация мягкой каркасированной сферообразной оболочки под действием системы приложенных к ней внешних и внутренних сил характеризуется изменением координат точек узлов и соответственно изменением объемов секций каркаса оболочки.

Система уравнений (2) с учетом граничных условий (3), (4) решается методом Рунге–Кутты четвертого порядка. В качестве начальной формы усеченной сферообразной мягкой пневмокаркасной оболочки принимается равновесная форма при  $P_Q = 0$  и  $P_P = P_{P0}$ .

## 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании разработанной авторами математической модели упругой деформации сферообразной пневмокаркасной оболочки при ударном нагружении была проведена оценка формообразования различных конструктивных схем пневмоконструкций. Рассматриваемые оболочки имели одинаковый радиус сферы  $R = 0,32$  м и были закреплены на твердом теле с различными углами раскрытия сферы, равными  $\Theta_H = 80^\circ \dots 200^\circ$ .

Потенциальные возможности предлагаемого алгоритма численного расчета, который позволяет рассчитать упругую деформацию пневмоконструкций различной конфигурации и изготовленных из материалов с различными физико-техническими характеристиками при динамическом нагружении в составе системы «твердое тело–мягкая оболочка», отчетливо демонстрируются на рис. 2, а, б.

Исследования показали, что основными параметрами системы «твердое тело–мягкая оболочка», существенно влияющими на поса-

дочные характеристики, являются угол раскрытия сферы  $\Theta_H$  и погонный модуль упругости  $E$  материала тканой оболочки, из которой изготовлена пневмоконструкция.

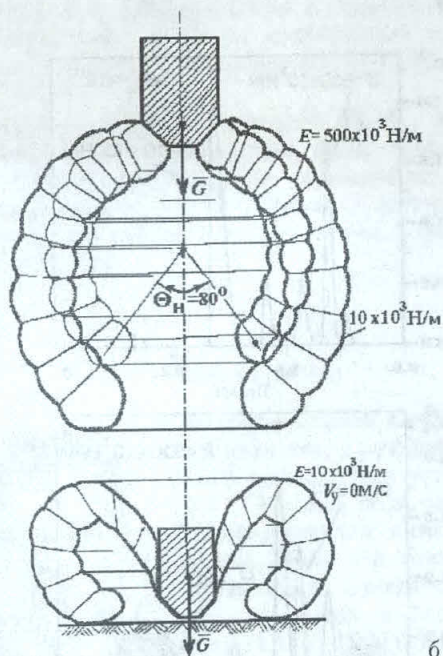


Рис. 2. Формообразование низко модульных сферообразных оболочек при ударном нагружении: а — влияние растяжимости материала мягкой оболочки на начальную форму пневмоконструкции; б — форма пневмоконструкции, изготовленная из материала с модулем упругости  $E = 10 \times 10^3$  Н/м

Анализ полученных результатов указал на целесообразность вначале рассмотреть механизм возникновения эффекта авторегулирования давления в подкупольной полости незамкнутой сферообразной пневмоконструкции путем оценки процесса массообмена рабочего тела между полостями пневмоконструкции и окружающей средой, а уже затем на его базе проанализировать полученные посадочные характеристики системы «твердое тело–мягкая оболочка».

Процесс массообмена рабочего тела между полостями рассматриваемых пневмоконструкций носит пульсирующий характер и описывается амплитудой и частотой изменения воздушного зазора между нижней кромкой пневмоконструкций и экраном. Результаты исследований изменения воздушного зазора представлены на рис. 3. Видно, что сферообразным незамкнутым надувным оболочкам присущ эффект авторегулирования давления в подкупольной полости при ударном взаимодействии с экраном. Увеличение угла раскрытия сферы и снижение погонного мо-

для упругости материала оболочки ведут к запаздыванию процесса открытия подкупольной полости и соответственно сдвигают по времени начало перепуска рабочего тела в атмосферу.

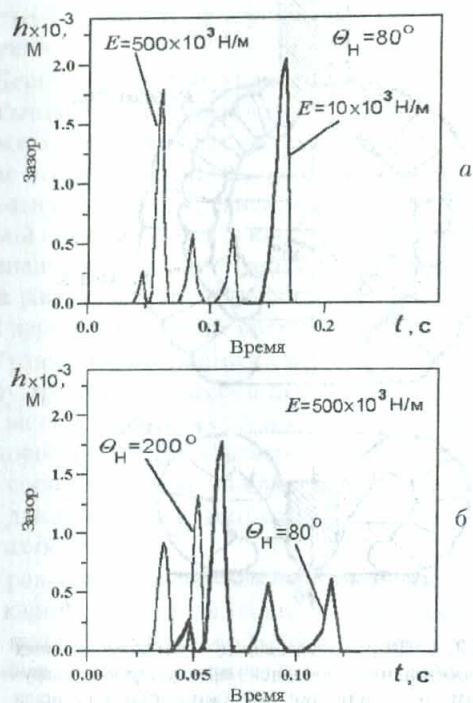


Рис. 3. Изменение воздушного зазора при обжатии сферических оболочек: а — для оболочек, изготовленных из разномодульных материалов; б — для различных конструктивных схем

Исследования показали, что частота выброса рабочего тела в атмосферу не зависит от угла раскрытия сферы, тогда как модуль упругости материала оболочки существенно влияет на параметры процесса перепуска рабочего тела. Особенно ярко это влияние проявляется для мягких оболочек, изготавливаемых из низко модульных материалов с  $E < 20 \times 10^3$  Н/м, для которых характерен один выброс рабочего тела.

Характер изменения воздушного зазора накладывает существенный отпечаток на распределение давления в подкупольной полости и, как следствие, на уровень перегрузки, развиваемой на твердом теле при ударном взаимодействии с экраном. Поэтому снижение угла раскрытия сферы  $\Theta_H$  ведет к увеличению рабочего хода обжатия пневмоконструкции к снижению уровня перегрузки  $N_Y$ , развиваемой в теле при ударе системы «твердое тело—мягкая оболочка» об экран (рис.4,б). Исследования показали, что уровень перегрузки не зависит от физико-технических характеристик материалов, применяе-

мых для оболочек, однако положение пика перегрузки по мере снижения модуля упругости смещается по времени, что ведет к трансформации переднего фронта диаграммы изменения перегрузки (рис. 4, а).

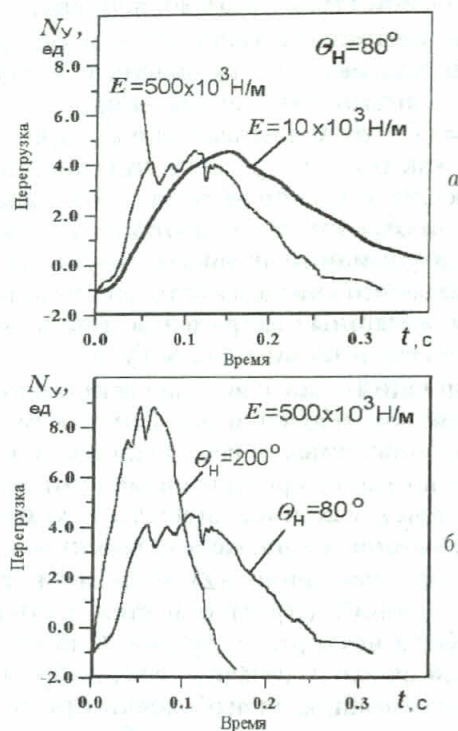


Рис. 4. Зависимость уровня перегрузки от времени при ударном нагружении системы: а — для оболочек, изготовленных из разномодульных материалов; б — для оболочек с различными углами раскрытия сферы

Изменение эпюры распределения давлений в полостях рассматриваемых пневмоконструкций ведет к существенному изменению ее напряженно-деформированного состояния. Особенно ярко это проявляется при изменении конструктивной схемы системы. Увеличение угла раскрытия сферы ведет к снижению широтных натяжений и росту меридиональных натяжений на внешней поверхности концевой части незамкнутой пневмоконструкции. Уменьшение угла раскрытия незамкнутой сферы, т. е. приближение ее формы к сфере, ведет к снижению меридиональных натяжений, но при этом растут натяжения в заделке оболочки на твердом теле. Перераспределение натяжений при динамическом нагружении мягкой оболочки особенно сильно зависит от растяжимости применяемого материала (рис.5). Видно, что широтные натяжения, которые преобладали при нагружении пневмоконструкций, изготовленных из высоко модульных тканей, уже стано-

вятся меньше широтных в пневмоконструкциях низкомодульных тканей.

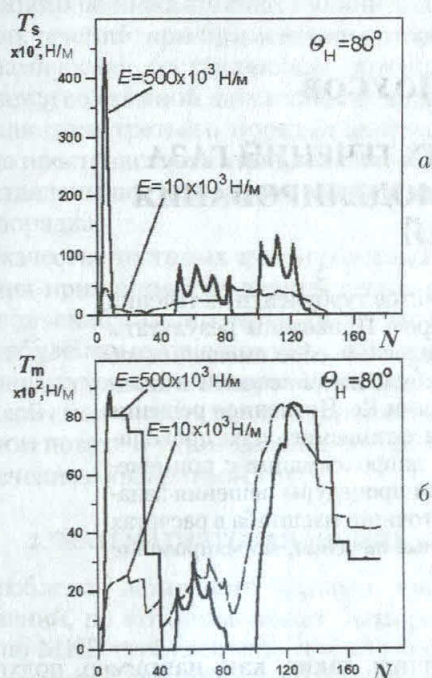


Рис. 5. Изменение НДС рассматриваемых пневмоконструкций при динамическом нагружении: а — широтные; б — меридиональные

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель динамического взаимодействия системы «твердое тело—мягкая оболочка» с экраном и алгоритм численного расчета упругой деформации пневмокаркасной оболочки, закрепленной на твердом теле, при ударном взаимодействии с экраном позволили расширить действие эффекта авторегулирования давления в подкупольной полости на новый класс оболочек — незамкнутых со сферической образующей. Вертикальная жесткость рассматриваемых пневмоконструкций, определяющая рабочий ход обжатия, регулируется давлением наддува пневмокаркаса, положение пика на диаграмме перегрузки задается углом раскрытия сферы, а равнопрочность пневмоконструкции обеспечивается подбором физико-технических характеристик тканого материала, из которого изготовлена оболочка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвиленева Н. Ю. Динамика формообразования мягких конусообразных пневмокаркасных оболочки при взаимодействии с экраном // Проектирование и расчет конструкций из мягких оболочек. Владивосток: ДВГМА, 1994. С. 63–85.
2. Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвиленева Н. Ю., Валиуллина Э. Э. Численное моделирование посадки спускаемых объектов с пневмоамортизаторами // Актуальные проблемы авиадвигателестроения. Уфа, 1998. С. 415–435.

### 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.



**Юдин Виктор Федорович**, зам. ген. директора по качеству КумАПП. Дипл. инж.-механик по самолетостроению (Харьковск. авиац. ин-т, 1967). Исследования и разработки в области перспективных средств спасения спускаемых объектов.