

УДК 629.7.027

С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН

АВТОКОЛЕБАНИЯ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С ПНЕВМОУПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ

Исследуется посадка спускаемых объектов, снабженных пневмоупругим основанием. Строится математическая модель динамического взаимодействия двухмассовой системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана и проводятся параметрические исследования посадочных характеристик. Дается оценка устойчивости автоколебаний рассматриваемой динамической системы. *Пневмоупругое основание; двухмассовая система; нелинейный источник энергии; пневмоамортизатор; автоколебания*

Задача циклического ударного нагружения прыгающих сферообразных пневмокаркасных мягких оболочек рассматривалась в работе [1]. Динамическое взаимодействие свободно падающих сферообразных пневмоконтрукций с экраном достаточно подробно исследовано в работе [2]. Исследования показали, что подобные системы при определенных условиях входят в режим автоколебаний. В данной работе проведены исследования динамического взаимодействия автоколебательной двухмассовой системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана.

1. ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С НЕЛИНЕЙНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

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. 1).

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_{P_0} и внутренней полости P_{Q_0} сферообразной оболочки.

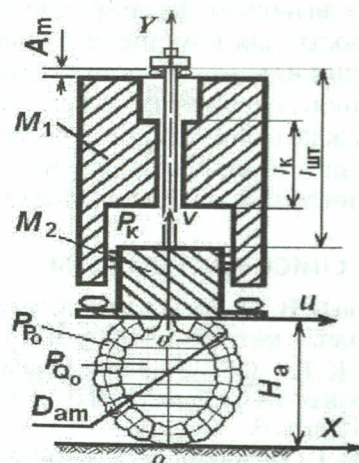


Рис. 1

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 этом рабочее тело, заключенное в основании, сжимается от давления $P_{P_0} = 0,1$ МПа до давления $P_P = 0,3-0,5$ МПа и аккумулируется, таким образом обеспечивая продувку и подачу топливоздушную 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 цилиндрической полости верхнего тела M_1 , далее в тексте для удобства называемой межпоршневой камерой.

В момент зануления разности скоростей взаимодействующих тел системы должно

произойти воспламенение топливоздуш- ной смеси. При воспламенении смеси да- вление в межпоршневой камере начинает интенсивно расти, что ведет, с одной стороны, к увеличению степени обжатия пневмоаморти- затора, а с другой — к разгону верхнего твер- дого тела M_1 . Рассматриваемая система тре- бует тщательного согласования пневможест- костей двух последовательно расположенных полостей (межпоршневой камеры и пневмо- амортизатора), в которых происходит непре- рывное изменение объема.

При этом важно в каждый момент вре- мени точно определять взаимное положение верхнего и нижнего твердых тел в движущей- ся системе. Так, недостаточная скорость дви- жения системы в момент касания экрана не обеспечивает требуемой степени сжатия топ- ливовоздушной смеси в межпоршневой каме- ре, а чрезмерная посадочная скорость ведет к «пробою» пневмоамортизатора.

По мере расширения рабочего тела сила упругости пневмоамортизатора начинает пре- восходить силу давления отработанных газов на нижнее твердое тело, и оно начинает дви- гаться вверх, стремясь догнать верхнее тело M_1 . Но так как верхнее тело M_1 имеет боль- шую массу, то оно движется быстрее и в ко- нечном итоге при достижении штангой рабо- чего хода пульсатора L , заданного фикса- тором, оно начинает тянуть за собой все систему в целом.

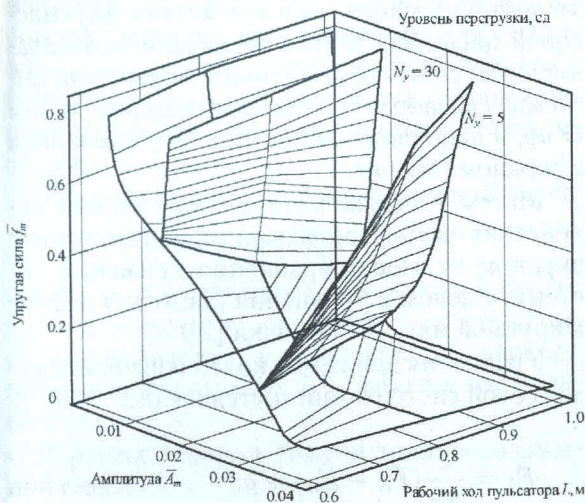


Рис. 2

При этом возможен жесткий удар верхне- го твердого тела об упор штанги. Для умень- шения жесткости удара в конце штанги раз- мещается амортизатор. С целью оценки бес- контактной области взаимодействия указан-

ных твердых тел были проведены параметри- ческие исследования в поле всех основных па- раметров двухмассовой системы. Результаты исследований приведены на рис. 2, где $A_m = A/L$ — относительный размер амортизато- ра; $f_m = \bar{f}_m A_m / M_1 g L$ — безразмерный пара- метр жесткости амортизатора, $L = l_{шт} - l_p - A_m$ — рабочий ход пульсатора.

В качестве нелинейного источника энер- гии в данном исследовании используется устройство типа двигателя внутреннего сго- рания, подвижная межпоршневая камера ко- торого формируется верхним и нижним твер- дыми телами рассматриваемой двухмассовой системы.

Ввиду сложности описания рабочих про- цессов нелинейного пульсатора, который со- держит множество экспериментальных коэф- фициентов, зависящих от типа и конструкции объекта, в предлагаемой математической мо- дели пульсатора используются усредненные индикаторные диаграммы и интегральные па- раметры циклов, средних температур и дав- лений существующих двигателей внутренне- го сгорания [3].

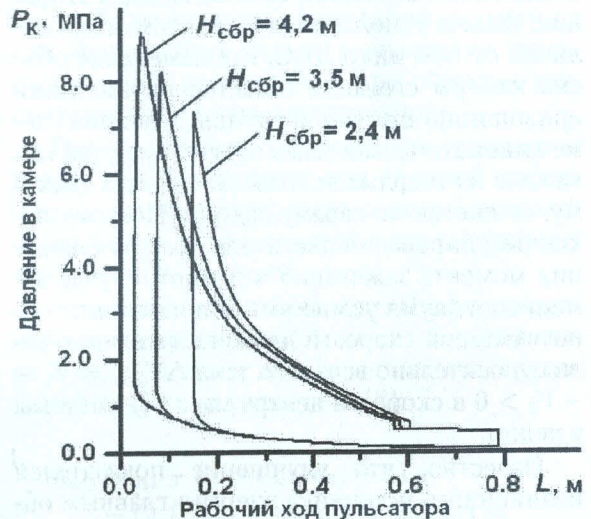


Рис. 3

Индикаторная диаграмма рассматривае- мого в работе нелинейного пульсатора при- ведена на рис. 3. Видно, что степень сжатия топливоздушной смеси пульсатора зависит от высоты отскока системы: чем выше отскок, тем с большей высоты падает двухмассовая система и большая степень сжатия рабочего тела в межпоршневой камере.

Таким образом, нелинейный источник энергии — пульсатор в рассматриваемой систе- ме работает в режиме с переменной степенью

сжатия. Последнее объясняется меняющимися свойствами (податливостью) пневмоупругого основания и экрана, нестабильностью процесса воспламенения топливовоздушной смеси и т. д.

Поэтому при построении математической модели пульсатора необходимо связать закон изменения степени сжатия в межпоршневой камере с величиной рабочего хода двухпоршневой системы твердых тел, а также постоянно корректировать начальные условия введения в работу нелинейного источника энергии, т. е. обеспечивать выход динамической системы на режим автоколебаний при всех условиях эксплуатации.

Как следует из описания работы системы, эффективность нелинейного пульсатора в значительной степени зависит от момента воспламенения сжатой в межпоршневой камере топливовоздушной смеси. Важно осуществить подвод энергии горячей смеси с момента максимального сжатия смеси, т. е. когда расстояние между твердыми телами M_1 и M_2 минимально, а скорость $V_{отн} = V_1 - V_2 > 0$. Кроме того, необходимо обеспечить условие, чтобы процесс горения происходил при минимальном изменении объема камеры сгорания. Задача усложняется еще и тем, что в отличие от обычного ДВС, где изменение объема камеры сгорания задается параметрами кривошипно-шатунной группы, в данной схеме кинематическая связь отсутствует, так как каждое из твердых тел, составляющих систему, движется по своему закону. Поэтому закон регулирования двигателя по углу смещения момента зажигания в данном случае заменяется двумя условиями минимизации: относительной скорости движения нижнего тела относительно верхнего тела $\Delta V_{отн} = V_1 - V_2 > 0$ и скорости центра масс $V_{цм}$ системы в целом.

Известно, что улучшение показателей нелинейного источника энергии главным образом связано с совершенствованием процесса газообмена и переходом к несимметричным фазам газораспределения.

Газообмен в нелинейном источнике энергии, как и в двухтактном ДВС, характеризуется отсутствием специальных тактов впуска и выпуска. Воздух для продувки камеры должен быть предварительно сжат в пневмоамортизаторе и накоплен в аккумуляторе, т. е. газообмен межпоршневой камеры пульсатора связан с газообменом в двух объемах, а именно в пневмоупругом основании и аккумуляторе. Продукты сгорания вытесняются

из межпоршневой камеры не только встречным движением твердых тел, но и еще потоком воздуха, сжатым в пневмоамортизаторе, и свежей топливовоздушной смесью. Принятая контурная продувка межпоршневой камеры исключает смещение топливовоздушной смеси и продуктов сгорания, т. е. потерю свежей смеси, что увеличивает коэффициент избытка продувочной смеси и снижает удельный расход топлива.

Управление впуска с помощью клапанов позволяет реализовывать любые несимметричные относительно ВМТ фазы впуска при любых режимах движения двухмассовой системы. После закрытия впускных окон происходит сжатие топливовоздушной смеси в межпоршневой камере.

Следующая особенность системы — большой рабочий ход твердых тел, формирующих межпоршневую камеру $L/D_P > 8$ пульсатора. Исследования [4] показали, что с увеличением рабочего хода пульсатора L отскок системы резко возрастает. Поэтому выбор параметров пульсатора тесно связан с эксплуатационными характеристиками автоколебательной двухмассовой системы в целом.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С ЭКРАНОМ

При построении математической модели динамического взаимодействия двухмассовой пневмосистемы с экраном использовались две системы координат: подвижная система, связанная с нижним твердым телом $O'uv$, и неподвижная система Oxy , связанная с экраном (см. рис. 1).

Математическая модель ударного взаимодействия рассматриваемой пневмосистемы с экраном включает уравнения движения системы в целом и уравнения движения деформируемой мягкой оболочки [2].

Уравнения движения колеблющейся двухмассовой системы запишутся в виде:

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

где M_1 — масса верхнего тела; M_2 — масса нижнего тела; σ — поверхностная плотность материала пневмоупругого основания; R_1, R_2 — радиусы вектора положения центров масс тел; \vec{F}_E — сила, развиваемая нелинейным пульсатором; \vec{F}_B — сила взаимодействия с амортизаторами; r — радиус-вектор, описывающий поверхность пневмоупругого основания; P_i, ρ_i — давление и плотность газа в i -м отсеке пневмоупругого основания; Q_{ik} — массовый расход воздуха из i -й полости пневмоупругого основания объема W_i в k -ю полость; γ — показатель адиабаты; F_C — силы реакции пневмоупругого основания; 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 пневмоупругого основания; g — ускорение свободного падения.

Первое и второе уравнения системы (1) описывают колебательное движение верхнего и нижнего твердого тела рассматриваемой системы 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.

С учетом сказанного в математической модели динамического взаимодействия двухмассовой системы с нелинейным пульсатором используются следующие аппроксимационные зависимости, описывающие основные газодинамические процессы пульсатора в параметрах рассматриваемой динамической системы.

Процесс сжатия топливовоздушной смеси

$$P_k = 0,3 + P_0(L/y_d + 0,01)^{1,4}, \quad (2)$$

где $P_0 = 1$ — давление окружающей среды; $y_d = y_1 - y_2$; y_1 — координата нижней кромки верхнего тела; y_2 — координата верхней кромки нижнего тела; L — рабочий ход пульсатора.

Процесс горения сжатой топливовоздушной смеси

$$P_{кг} = P_k + 6,0, \quad (3)$$

где $P_k = 0,3 + (L/y'_d + 0,01)^{1,32}$; y'_d — координата нижней кромки нижнего тела.

Процесс расширения (рабочий ход) продуктов сгорания смеси

$$P_k = P_{кг}F(y'_d), \quad (4)$$

где $y'_d = (y_d - y'_d)/(L - y'_d)$, $F(y'_d) = 1,12 - 6,72y'_d + 22,2y'^2_d - 39,25y'^3_d + 33,89y'^4_d - 11,22y'^5_d$.

Сила давления, развиваемая в межпоршневой камере, равна

$$F_E = (P_k - 1)S_p, \quad (5)$$

где $S_p = \pi D_p^2/4$ — площадь поперечного сечения нижнего твердого тела.

Воспламенение топливовоздушной смеси должно осуществляться при выполнении двух условий: $V_{отн} = V_1 - V_2 > 0$, $V_{цм} > 0$, — которые целесообразно объединить в неравенство

$$V_{цм} + K\Delta V_{отн} > 0, \quad (6)$$

где K — коэффициент усиления системы.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИИ ПНЕВМОУПРУГОГО ОСНОВАНИЯ

Пневмоконтрукция 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 пневмоконтрукции.

Взаимодействие выделенных элементов между собой возникает при сильной деформации пневмоконтрукции 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 [2]:

$$\begin{aligned} m_{mj}(\ddot{u}_{mj} + \ddot{x}) + C_a(\dot{u}_{mj} + \dot{x}) + \\ + C_r(2\dot{u}_{mj} - \dot{u}_{m,j-1} - \dot{u}_{m,j+1}) = \\ = F_{u_{mj}}(u, v); \\ m_{mj}(\ddot{v}_{mj} + \ddot{y} + g) + C_a(\dot{v}_{mj} + \dot{y}) + \\ + C_r(2\dot{v}_{mj} - \dot{v}_{m,j-1} - \dot{v}_{m,j+1}) = \\ = F_{v_{mj}}(u, v), \end{aligned} \quad (7)$$

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} , \dot{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.

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 не проникновение через каждый из элементов сети, и характерный параметр \tilde{E} , ограничивающий расстояние, на которое узел может приблизиться к элементу сетки. Условия не проникновения j -го узла сквозь отрезок при этом записываются в виде $y'_t - \tilde{E} > 0$ при $y'_t > \tilde{E}$ и $y'_t - \tilde{E} < 0$ при $y'_t < \tilde{E}$, где y'_t — 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

$$T^B = \begin{cases} A \left| \frac{y'_t - \tilde{E}}{2\tilde{E}} \right|, & \text{при } y'_t < \tilde{E}; \\ 0, & \text{при } y'_t > \tilde{E}, \end{cases} \quad (8)$$

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:

- в местах крепления оболочки к нижнему твердому телу:

$$\begin{aligned} y_1 &= y_N = y_0; & \dot{y}_1 &= \dot{y}_N = V_{y0}; \\ v_1 &= v_N = 0; & \dot{v}_1 &= \dot{v}_N = 0; \\ x_1 &= x^0; & x_N &= x_N^0; & \dot{x}_1 &= \dot{x}_N = 0; \\ u_1 &= x^0; & x_N &= x_N^0; & \dot{u}_1 &= \dot{u}_N = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$u_{l-k} = u_{l-k}^0; \quad u_{l+k} = u_{l+k}^0. \quad (10)$$

Система уравнений (1)–(7) с учетом граничных условий (8)–(10) решается методом

Рунге–Кутты четвертого порядка. В качестве начальной формы мягкой оболочки принимается форма при $P_Q = P_{Q_0}$ и $P_P = P_{P_0}$.

4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривается динамическое взаимодействие автоколебательной двухмассовой системы массой $M = 120$ кг, в начальный момент падающей на экран с высоты $H_{сбр} = 1,2$ м, снабженной пневмоупругим основанием в виде многополостных сферообразных оболочек с диаметрами, равными $D_{am} = 0,3$ м и $0,5$ м и закрепленными на нижнем твердом теле. Мягкие оболочки нагружены внутренним давлением и изготовлены из анизотропного материала с погонными модулями упругости в широтном и меридиональном направлениях, равными $E_s = E_m = 0,5 \times 10^6$ Н/м (см. рис. 1).

Энергоемкость рассматриваемого пневмоупругого основания зависит от величины давления наддува как внутренней полости P_{Q_0} основания, так и его пневмокаркаса P_{P_0} . В качестве условий, ограничивающих энергоемкость пневмоупругих оснований, принимаются прочность анизотропного материала, из которого изготовлена мягкая оболочка, и уровень перегрузки N_y , развиваемой в центре масс двухмассовой системы при ударном взаимодействии с экраном.

Основным параметром пневмоупругого основания является упругая характеристика — зависимость силы упругости F_E от степени обжатия пневмооснования $\tilde{H}_a = y_2/H_a$ [5].

Параметрические исследования показали, что упругая характеристика пневмоупругого основания, кроме геометрических параметров, существенно зависит от давления наддува пневмокаркаса (рис. 4). На рис. 4, а показана амплитуда давления наддува пневмокаркаса на амплитуду автоколебаний, а на рис. 4, б — на уровень давления во внутренней полости мягких сферообразных оболочек различного диаметра. Поэтому базовые параметры рассматриваемой двухмассовой системы, такие как отскок системы на обратном ходе обжатия пневмоупругого основания и давление воздуха во внутренней полости деформируемого основания, который необходим для продувки межпоршневой камеры пульсатора, существенно зависят от давления наддува пневмокаркаса основания P_{P_0} .

Видно, что с увеличением давления наддува пневмокаркаса высота отскока двухмассовой системы при динамическом взаимо-

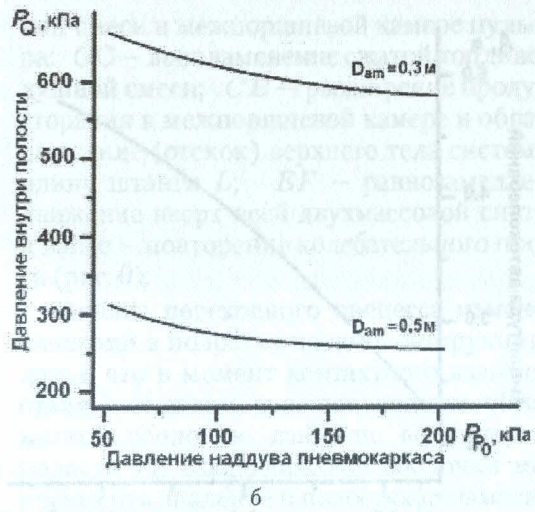
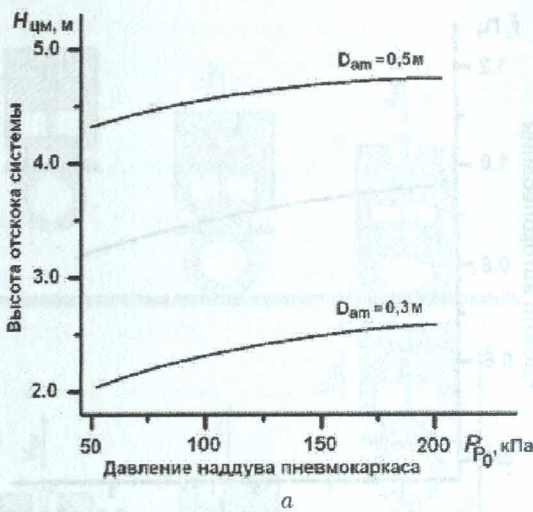


Рис. 4

действию с экраном пропорционально растет, а давление воздуха во внутренней полости пневмоупругого основания падает.

Упругие характеристики пневмоупругих оснований, принятые в исследовании, представлены на рис. 5. Видно, что обе упругие характеристики имеют нелинейный вид и включают гистерезисные процессы, вызванные силами демпфирования движения двухмассовой системы на прямом и обратном ходе обжатия пневмоупругого основания.

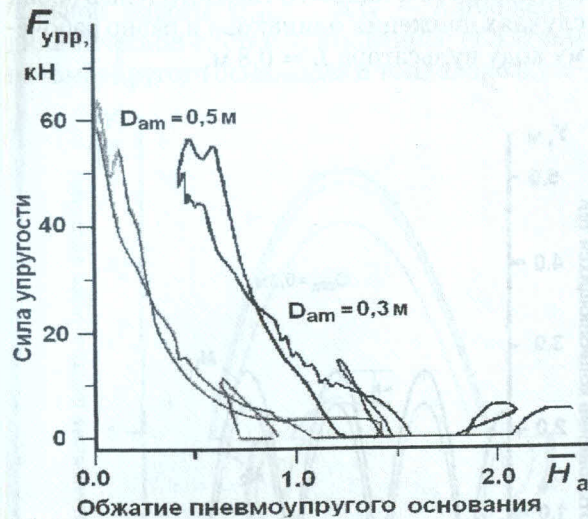


Рис. 5

При исследовании переходных процессов выхода двухмассовой системы на режим установившихся автоколебаний и при построении фазового портрета системы используется аппроксимация упругой характеристики дефор-

мации пневмооснования в виде

$$F_{упр} = K_m (118,54 - 303,19 \bar{H}_a + 277,62 \bar{H}_a^2 - 93,63 \bar{H}_a^3). \quad (11)$$

Реакция пневмоупругого основания с учетом сил демпфирования равна

$$F_{ам} = F_{упр} + F_{дем}, \quad (12)$$

где $F_{дем} = -10^5 (1 - y_2/H_a) \bar{V}_2 |\bar{V}_2|$ — сила демпфирования; K_m — масштабный коэффициент.

Переходные процессы выхода рассматриваемых двухмассовых систем на установившийся режим автоколебаний по перемещению центра масс системы приведены на рис. 6.

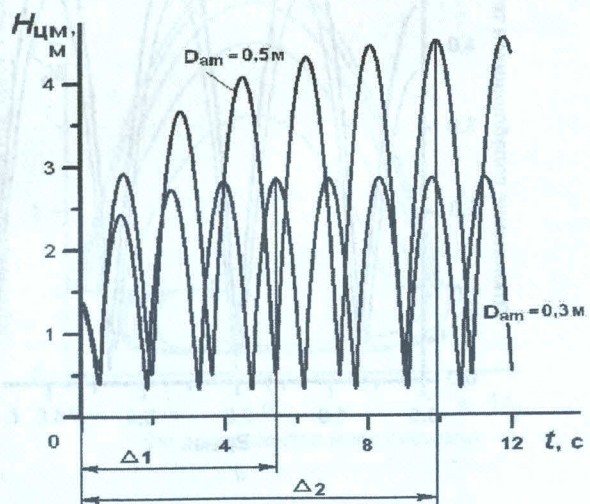


Рис. 6

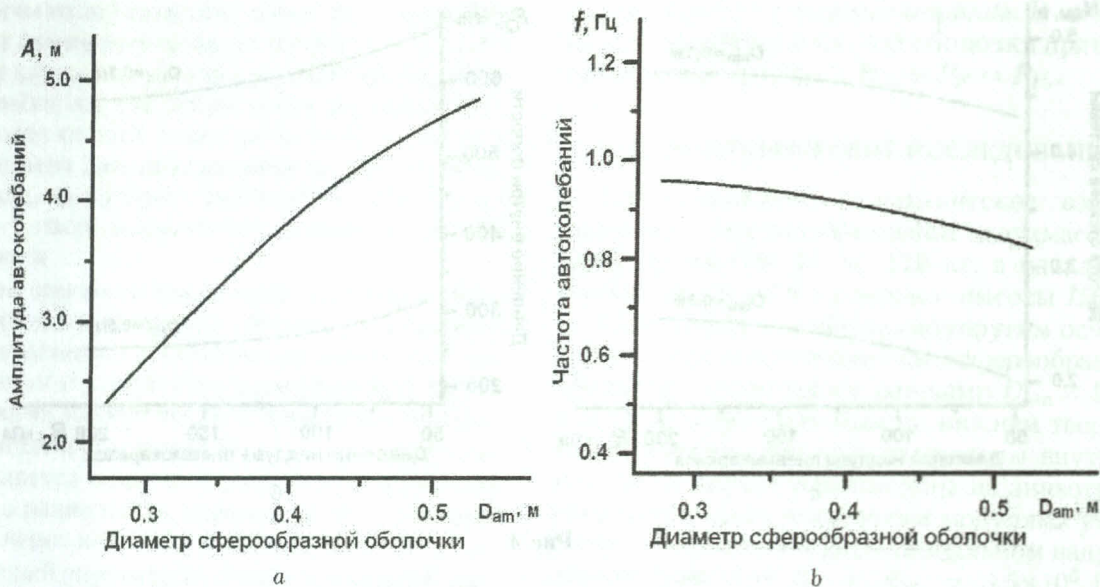


Рис. 7

Видно, что выход системы на установившийся режим автоколебаний зависит от геометрических параметров пневмооснования. Двухмассовая система, снабженная пневмоупругим основанием с характерным размером $D_{am} = 0,3$ м, выходит на режим установившихся автоколебаний за $\Delta_1 = 5,5$ с, а система с диаметром сферической мягкой оболочки, равным $D_{am} = 0,5$ м, за $\Delta_2 = 10$ с.

С увеличением характерного размера пневмоупругого основания D_{am} происходит резкий рост высоты отскока двухмассовой системы и давления во внутренней полости

основания, кроме того, увеличение диаметра сферической оболочки ведет к росту амплитуды A_m (рис. 7, а) и к снижению частоты f автоколебаний, что свойственно нелинейным системам (рис. 7, б).

Типичные осциллограммы процесса установившихся автоколебаний двухмассовой системы приведены на рис. 8, а, б соответственно для $D_{am} = 0,3$ м и $D_{am} = 0,5$ м. Видно, что наибольшее отстояние траектории движения верхнего и нижнего твердого тела в обоих случаях движения одинаково и равно рабочему ходу пульсатора $L = 0,8$ м.

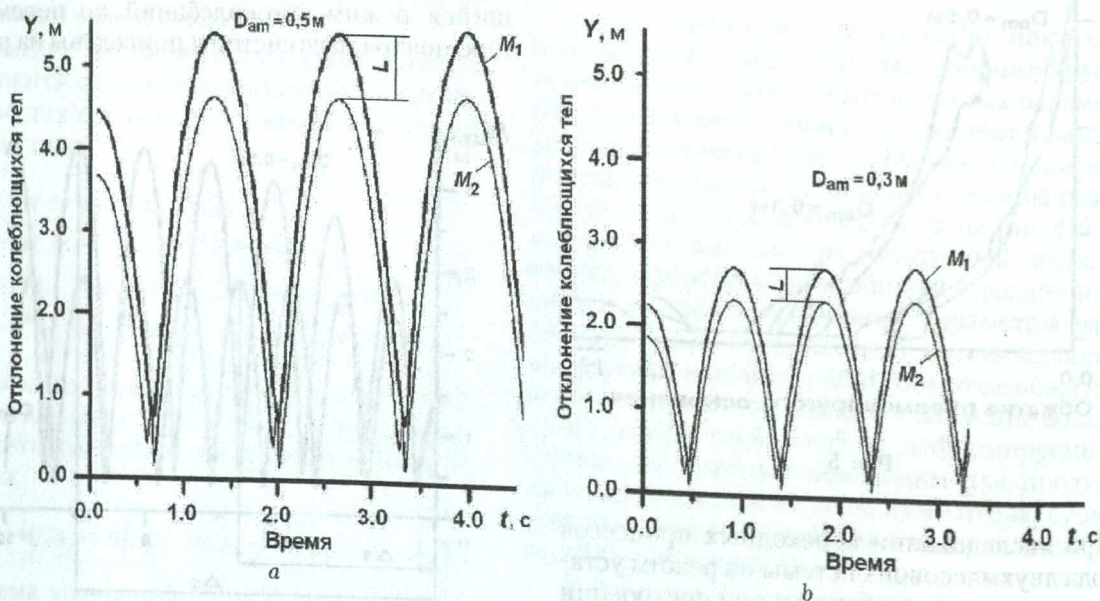


Рис. 8

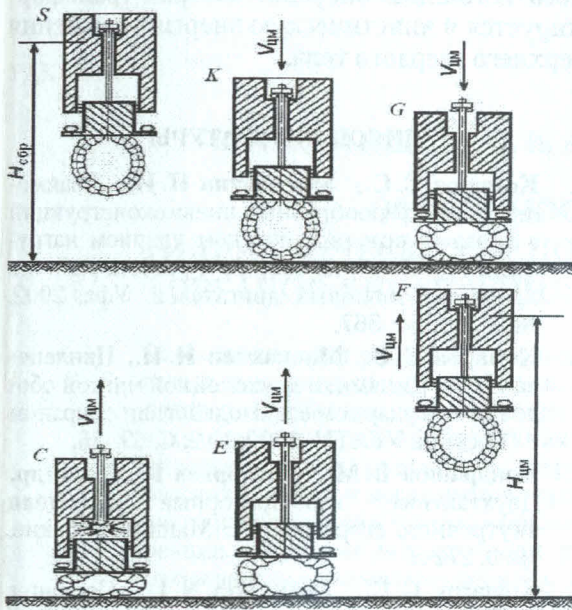


Рис. 9

Анализ процесса динамического взаимодействия двухмассовой системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана показал, что движение рассматриваемой системы состоит из ряда участков, включающих как движение под действием внешних сил, так и свободное движение в поле земного притяжения, а именно: *SK* — равноускоренное движение при свободном падении с заданной начальной высоты $H_{\text{собр}}$; *KG* — торможение динамической системы, вызванное обжатием пневмоупругого основания и топливовоздуш-

ной смеси в межпоршневой камере пульсатора; *GC* — воспламенение сжатой топливовоздушной смеси; *CE* — расширение продуктов сгорания в межпоршневой камере и обратное движение (отскок) верхнего тела системы на длину штанги L ; *EF* — равнозамедленное движение вверх всей двухмассовой системы, и далее — повторение колебательного процесса (рис. 9).

Анализ переходного процесса изменения давлений в полостях пневмоконструкции показал, что в момент контактного взаимодействия с экраном, т.е. при полном обжатии мягкой оболочки, давление во внутренней полости P_Q сферообразной оболочки может превысить давление в полостях пневмокаркаса P_P , однако форма каркаса оболочки при этом сохраняется за счет пиротных натяжений, развиваемых в оболочке.

Таким образом, энергия, подводимая от нелинейного источника к двухмассовой системе, аккумулируется в виде потенциальной энергии сжатого рабочего тела (воздуха) при обжатии мягкой оболочки и энергии упругой деформации деформированного пневмокаркаса, а затем срабатывает при отскоке пневмосистемы. При этом соотношение указанных энергий для нерасходных пневмоупругих оснований в рассматриваемых процессах составляет 2:1.

Известно, что наглядное и компактное представление результатов математического моделирования достигается при изображении динамического процесса на фазовой плоско-

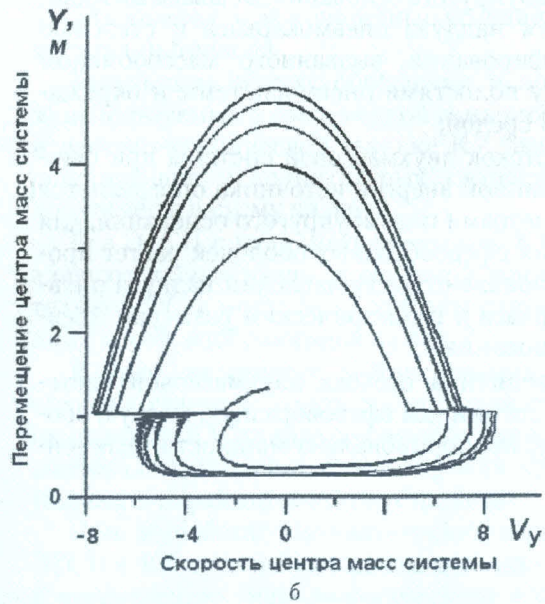
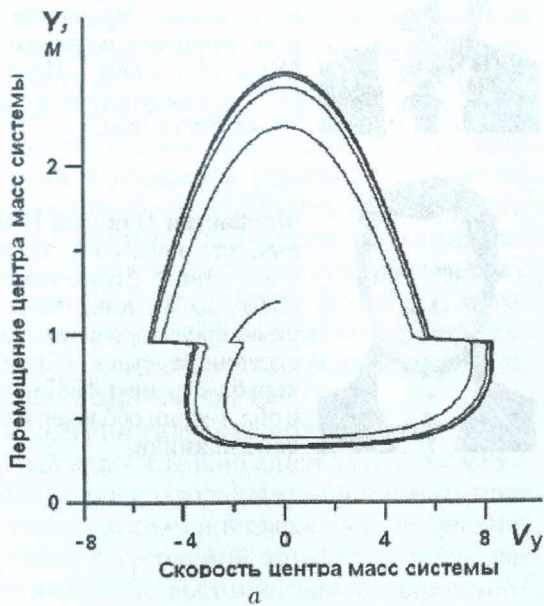


Рис. 10

сти, позволяющей проследить развитие колебательного движения рассматриваемой системы во взаимодействии с нелинейным источником энергии и выполнить оценку влияния жесткостных параметров системы на ее устойчивость.

В качестве иллюстрации сказанного в работе приведены фазовые плоскости процессов динамического взаимодействия автоколебательной системы с нелинейным источником энергии вблизи экрана, снабженной пневмоупругими основаниями, отличающимися конструктивными схемами. Для оболочки диаметром $D_{от} = 0,3$ м фазовая плоскость представлена на рис. 10, а. Фазовая плоскость процесса посадки спускаемого объекта со сферообразным пневмоупругим основанием, равным $D_{от} = 0,5$ м, приведена на рис. 10, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили выявить основные особенности динамического взаимодействия автоколебательных двухмассовых систем, снабженных пневмоупругим основанием с нелинейным источником энергии вблизи экрана.

Исследования показали:

- двухмассовая система, включающая пневмоупругое основание с отбором воздуха на продувку межпоршневой камеры пульсатора, находится в режиме установившихся автоколебаний, причем амплитуда колебаний системы определяется характеристиками пневмоупругого основания, задаваемыми давлением наддува пневмокаркаса и степенью демпфирования, вызванного массообменом между полостями пневмосистемы и окружающей средой;

- отскок двухмассовой системы при фиксированной энергии источника определяется параметрами пневмоупругого основания, для мягких сферообразных оболочек растет пропорционально росту давления наддува пневмокаркаса и геометрическим размерам пневмооснования;

- величина отскока двухмассовой системы, содержащей сферообразную мягкую оболочку, пропорциональна мощности нелиней-

ного источника энергии, которая трансформируется в кинетическую энергию движения верхнего твердого тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров С. С., Мискактин Н. И.** Взаимодействие сферообразных пневмоконструкций с экраном при циклическом ударном нагружении // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. Уфа, 2002. № 20. С. 354–367.
2. **Комаров С. С., Мискактин Н. И., Цвилева Н. Ю.** Динамика двухслойной мягкой оболочки при ударном взаимодействии с экраном // Вестник УГАТУ, 2000. № 2. С. 69–76.
3. **Кондрашов В. М., Григорьев Ю. С. и др.** Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
4. **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.
5. **Комаров С. С., Мискактин Н. И.** Анализ эффективности пневмоупругих систем при посадке спускаемых объектов // Вестник УГАТУ. 2002. Т. 3, № 2. С. 179–186.

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 транспортных 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.