УДК 539.3; 624.074

К. В. Аврамов [1], М. В. Чернобрывко [1], Т. Я. Батутина [2], П. Г. Дегтяренко [2], А. М. Тонконоженко [2]

[1] Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков
[2] Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ

Рассматриваются аэроупругие колебания обтекателей ракет-носителей, которые являются параболическими или коническими оболочками. Такие оболочки усиливаются изнутри стрингерами и шпангоутами. Исследуется динамическая неустойчивость таких конструкций в сверхзвуковом газовом потоке, который описывается поршневой теорией.

Ключевые слова: *колебания обтекателя, коническая оболочка со шпангоутами, сверхзвуковой газовый поток, пространственная форма потери устойчивости.*

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются обтекатели ракет-носителей, которые защищают полезный груз при выводе его на орбиту. В процессе полета ракеты обтекатели взаимодействуют со сверхзвуковым газовым потоком. Эти конструкции моделируются тонкими оболочками, которые могут быть параболической или конической формы. Они сочленяются с цилиндрической оболочкой. Внутри такие конструкции часто усиливаются стрингерами и шпангоутами.

Свободные колебания и динамическая неустойчивость параболических обтекателей ракет-носителей рассматривается в работах [6, 7, 11]. Оребрению тонкостенных конструкций посвящены статьи [3, 4].

Ниже коротко представлены результаты исследований динамической неустойчивости конических оребренных шпангоутами обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке.

Из экспериментальных исследований следует, что при скоростях полета ракеты немного больше одного Маха наблюдаются интенсивные автоколебания обтекателей. В отдельных случаях такие колебания могут привести к разрушению конструкции или к поломкам полезного груза.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обтекатель ракеты-носителя моделируется тонкой оболочкой. Поэтому сдвиги и инерция вращения не учитывается. Напряжения и деформации в оболочке предполагаются малыми, поэтому они удовлетворяют закону Гука. Предполагается, что напряженно-деформированное состояние оболочки описывается гипотезами Киргофа — Лява. Коническая оболочка высотой H и радиусом основания R является изотропной и тонкой (рис. 1). Оболочка имеет постоянную толщину h. Предполагается, что в основании оболочка жестко защемлена.

Образующая конической оболочки имеет с осью z угол α. Изнутри оболочка усиливается N кольцами, которые располагаются параллельно основанию оболочки на одинаковом расстоянии друг относительно друга. Предполагается, что все кольца изготовлены из одинакового материала и имеют одинаковые поперечные сечения. Кольца изгибаются в своей плоскости и в перпендикулярном направлении. Более того, они испытывают кручение и растяжение-сжатие. При колебаниях обшивки кольца совершают изгибно-изгибно-крутильно-продольные колебания [8].

Свяжем с оболочкой криволинейную систему координат (s,ϕ,ξ) (рис. 1). Коэффициенты Лямэ принимают следующие значения: $A_1 = 1$, $A_2 = s \cdot \sin\alpha$. Радиусы кривизн координатных линий s и ϕ таковы: $R_s = +\infty$, $R_\phi = s \cdot \mathrm{tg}\alpha$. Шпангоуты крепятся в точках со следующими значениями координат образующей:

$$s_j^* = jH/[(N+1)\cos\alpha], \quad j = \overline{1,N}.$$

Проекции перемещений точек оболочки на направления s, ϕ и ξ обозначим $u(s,\phi,t)$, $v(s,\phi,t)$ и $w(s,\phi,t)$ соответственно.

Колебания оболочки опишем системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат. Для вывода этих уравнений воспользуемся методом заданных форм [2], который использует уравнения Лагранжа.

Потенциальная энергия конструкции представляется в виде суммы потенциальной энергии конической оболочки Π_1 и потенциальных энергий всех шпангоутов $\Pi_2^{(j)}$:

$$\Pi = \Pi_1 + \sum_{j=1}^{N} \Pi_2^{(j)}.$$

Потенциальная энергия конической обшивки принимает вид

$$\Pi_1 = D_1 \int_0^{2\pi} \int_{0^+}^{L} \left[(E_1 + E_2)^2 - \kappa \left(E_1 E_2 - \frac{\Omega_1^2}{4} \right) \right] \cdot s\,ds\,d\phi +$$
$$+ D_2 \int_0^{2\pi} \int_{0^+}^{L} [(K_1 + K_2)^2 - \kappa(K_1 K_2 - \Omega_2^2)] \cdot s\,ds\,d\phi +$$
$$+ D_3 \int_0^{2\pi} \int_{0^+}^{L} \{ E_1 K_1 + E_2 K_2 + \nu(E_1 K_2 + E_2 K_1) +$$
$$+ (1-\nu)\Omega_1 \Omega_2 \} \, ds\,d\phi. \qquad (1)$$

Здесь

$$D_1 = \frac{Eh \cdot \sin\alpha}{2(1-\nu^2)}, \quad D_2 = \frac{Eh^3 \sin\alpha}{24(1-\nu^2)},$$

$$D_3 = \frac{Eh^3 \cos\alpha}{12(1-\nu^2)}, \quad \kappa = 2(1-\nu),$$

E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона,

$$E_1 = \frac{\partial u}{\partial s}, \quad K_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial s},$$

$$E_2 = \frac{1}{s\mathrm{tg}\alpha} \left(\frac{\partial v}{\partial \phi} + u\mathrm{tg}\alpha + w \right),$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{s^2 \mathrm{tg}^2\alpha} \left[\frac{\partial v}{\partial \phi} - \frac{\partial^2 w}{\partial \phi^2} \right] - \frac{\partial w}{s \partial s} \right),$$

$$\Omega_1 = \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{\nu}{s} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{s\mathrm{tg}\alpha}.$$

Свяжем со шпангоутом локальную систему координат $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j)$; ось $\tilde{y}_j$ располагается вдоль продольной координаты шпангоута; ось $\tilde{z}_j$ направлена вдоль образующей конической оболочки; ось $\tilde{x}_j$ располагается так, что $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j)$ образуют правую тройку векторов. Изгиб шпангоута в двух плоскостях описывается перемещениями $u_j(\tilde{y}_j, t)$ и $w_j(\tilde{y}_j, t)$. Растяжение-сжатие шпангоута описывается перемещениями $v_j(\tilde{y}_j, t)$, а кручение моделируется функцией угла поворота $\phi_j(\tilde{y}_j, t)$. Потенциальную энергию j-го шпангоута представим в следующем виде:

$$\Pi_2^{(j)} = \frac{1}{2} \oint \left(E_j F_j \left(\frac{\partial v_j}{\partial \tilde{y}_j} - \frac{w_j}{R_j} \right)^2 + \right.$$
$$+ E_j J_{Z_j} \left(\frac{\partial^2 u_j}{\partial \tilde{y}_j^2} + \frac{\phi_j}{R_j} \right)^2 +$$
$$+ E_j J_{X_j} \left(\frac{\partial^2 w_j}{\partial \tilde{y}_j^2} + \frac{w_j}{R_j^2} \right)^2 +$$
$$\left. + G_j J_j \left(\frac{\partial u_j}{R_j \partial \tilde{y}_j} - \frac{\partial \phi_j}{\partial \tilde{y}_j} \right)^2 \right) d\tilde{y}_j, \qquad (2)$$

где E_j, G_j — модуль Юнга и модуль сдвига j-го шпангоута, F_j — площадь поперечного сечения

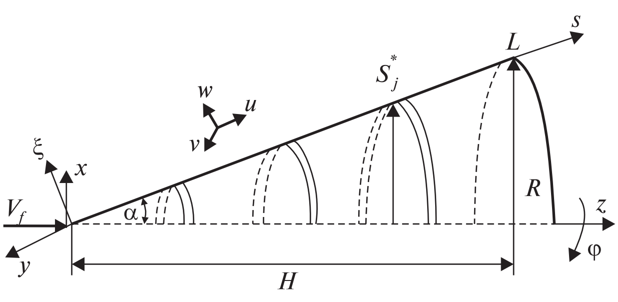

Рис. 1. Срединная поверхность конической оболочки со шпангоутами

шпангоута, J_{Z_j}, J_{X_j}, J_j — моменты инерции поперечных сечений шпангоута, R_j — радиус кривизны срединной линии j-го шпангоута.

Одна из сторон шпангоута жестко связана с внутренней поверхностью оболочки. Эта связь выражается соотношениями между обобщенными перемещениями оболочки и шпангоутов, которые представлены в работе [3]. Эти соотношения позволяют представить потенциальную энергию шпангоута через перемещения оболочки. Поэтому потенциальную энергию всей конструкции удается выразить через компоненты перемещений оболочки.

Кинетическая энергия конструкции состоит из кинетической энергии оболочки T_1 и кинетических энергий всех шпангоутов $T_2^{(j)}$:

$$T = T_1 + \sum_{j=1}^{N} T_2^{(j)},$$

где

$$T_1 = \frac{\rho h}{2} \int_0^{2\pi} \int_{0^+}^{L} s[\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2] \sin\alpha \, ds \, d\phi ,$$

ρ — плотность материала оболочки.

Оболочка снаружи обтекается газовым потоком. На значительном удалении от оболочки поток движется в положительном направлении оси z со сверхзвуковой скоростью V_f. В непосредственной близости от оболочки наблюдаются возмущения в параметрах потока. Используя соотношения поршневой теории [5, 7], виртуальную работу аэродинамического давления δA, действующего на поверхность оболочки, представим так:

$$\frac{\sqrt{M^2-1}}{V_f \rho_f} \delta \mathrm{A} = -\int_0^{2\pi} \int_{0^+}^{L} \left(V_f \frac{\partial w}{\partial s} + \right.$$
$$\left. + \frac{M^2-2}{M^2-1} \cdot \dot{w} \right) \cdot s \sin\alpha \cdot \delta w ds \, d\phi , \qquad (3)$$

где M — число Маха, ρ_f — плотность газа.

Динамику оболочки опишем моделью с конечным числом степеней свободы. Для вывода этой модели воспользуемся методом заданных форм. Компоненты перемещений оболочки разложим в ряд по собственным формам колебаний $U_n(s,\phi)$, $V_n(s,\phi)$, $W_n(s,\phi)$ так:

$$u(s,\phi,t) = \sum_{n=1}^{N_u} q_n^{(u)}(t) U_n(s,\phi);$$

$$v(s,\phi,t) = \sum_{n=1}^{N_v} q_n^{(v)}(t) V_n(s,\phi); \qquad (4)$$

$$w(s,\phi,t) = \sum_{n=1}^{N_w} q_n^{(w)}(t) W_n(s,\phi),$$

где

$$q^{(u)} = [q_1^{(u)}, \dots, q_{N_u}^{(u)}],$$
$$q^{(v)} = [q_1^{(v)}, \dots, q_{N_v}^{(v)}],$$
$$q^{(w)} = [q_1^{(w)}, \dots, q_{N_w}^{(w)}]$$

— векторы обобщенных координат. Разложения для перемещений (4) вводятся в кинетическую и потенциальную энергии конструкции и производятся необходимые интегрирования. В результате кинетическая и потенциальная энергии представляются в виде квадратичных форм относительно обобщенных координат и обобщенных скоростей. Тогда уравнения Лагранжа системы можно представить в виде

$$M_{11}\ddot{q}^{(u)} + K_{11}q^{(u)} + K_{12}q^{(v)} + K_{13}q^{(w)} = 0,$$
$$M_{22}\ddot{q}^{(v)} + K_{21}q^{(u)} + K_{22}q^{(v)} + K_{23}q^{(w)} = 0,$$
$$M_{33}\ddot{q}^{(w)} + K_{31}q^{(u)} + K_{32}q^{(v)} + K_{33}q^{(w)} +$$
$$+ K^{(w)}q^{(w)} + C^{(w)}\dot{q}^{(w)} = 0,$$

где M_{ii} — матрицы масс, которые являются диагональными, K_{il} — матрицы жесткости, $C^{(w)}$ — матрица аэродинамического демпфирования, $K^{(w)}$ — матрица аэродинамической жесткости.

Для анализа динамической неустойчивости конструкции рассчитывались характеристические показатели [1, 9]. Они находились при различных значениях чисел Маха. Определялся диапазон чисел Маха, где наблюдается динамическая неустойчивость.

Особое внимание в работе уделялось исследованию формы оболочки при потере ею динамической устойчивости в сверхзвуковом газовом потоке. Для этого был разработан подход, описанный в работе [7]. С помощью этого подхода численно исследовалась форма потери устойчивости конструкции.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим четыре варианта конструкции. Все конструкции состоят из конической оболочки высотой H = 5.24 м, радиусом R = 1.95 м и толщиной h = 2 мм с механическими характеристиками материала: E = 72 ГПа, ρ = 2770 кг/м^3, ν = 0.3. Первая конструкция представляет собой коническую оболочку без шпангоутов. Вторая, третья и четвертая конструкции содержат три, пять и семь шпангоутов соответственно. Площадь поперечных сечений шпангоутов F_j = = 570 мм^2. Расстояния между шпангоутами выбирались равными между собой и краями оболочки. Механические характеристики материала ребер не отличались от характеристик оболочки.

Проводились исследования собственных частот колебаний конструкций с различным числом шпангоутов методом Релея — Ритца. Полученные результаты сравнивались с данными программного комплекса ANSYS. Максимальная относительная погрешность не превышала 3 %.

На рис. 2 показаны графики собственных частот колебаний конструкций в зависимости от их номера n.

В результате численного анализа было установлено, что все четыре конструкции имеют одинаковый диапазон динамической неустойчивости для значений M : $1.01 \le M \le 1.414$. При $M > 1.414$ состояние равновесия конструкции устойчиво.

Численно определялась частота начала автоколебаний Ω_1 с помощью подхода, предложенного в работе [7]. Фактически находится частота, с которой колеблется конструкция при потере устойчивости. В таблице представлены результаты расчетов для моделей оболочек с 9, 12, 15, 18 и 21 степенями свободы. Как видно, для четырех рассматриваемых конструкций сходимость полученных результатов наблюдается при 15 степенях свободы.

Исследовались формы оболочки при начале автоколебаний конструкции в сверхзвуковом газовом потоке. В качестве примера на рис. 3 представлена форма потери динамической устойчивости конической оболочки с семью ребрами.

Значения критических частот автоколебаний Ω_1, Гц

N_w	Без ребер	3 ребра	5 ребер	7 ребер
9	63.180	65.623	57.841	58.256
12	57.113	58.938	60.113	60.147
15	56.657	60.007	60.532	60.734
18	56.392	60.319	61.096	61.045

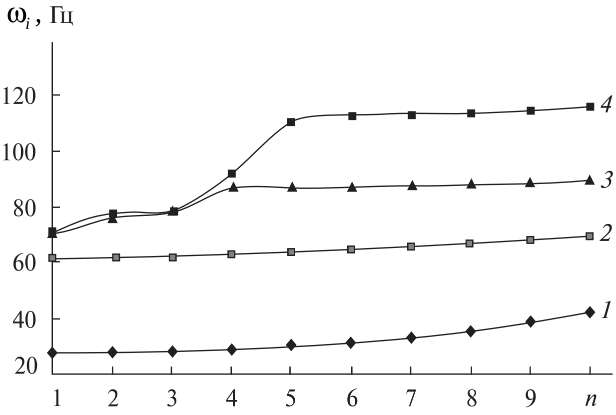

Рис. 2. Графики собственных частот колебаний конструкций: *1* — оболочка без ребер; *2*, *3*, *4* — оболочки с тремя, пятью, семью ребрами соответственно

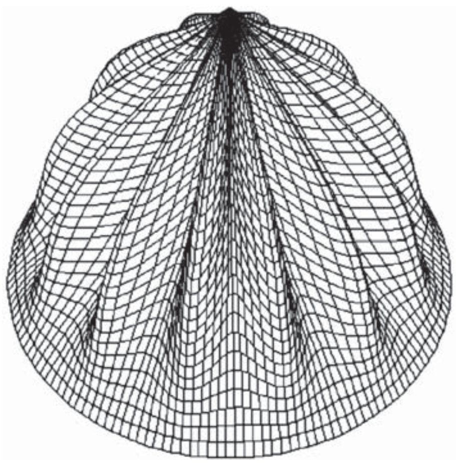

Рис. 3. Форма потери динамической устойчивости конической оболочки с семью ребрами

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследуется динамическая неустойчивость параболических и конических обтекателей ракет-носителей. Анализируются конструкции без усилений и конструкции со шпангоутами. Исследуются области динамической неустойчивости конструкций.

В дальнейшем нами будут исследоваться нелинейные колебания обтекателей ракет-носителей. В области динамической неустойчивости амплитуды колебаний конструкции на начальных интервалах времени растут. При амплитудах колебаний порядка толщины оболочки конструкция ведет себя геометрически нелинейно [10, 12]. Вследствие геометрической нелинейности амплитуды колебаний конструкции ограничиваются, и в системе возникает предельный цикл (автоколебания). Такие движения будут предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

1. *Аврамов К. В.* К аэроупругому взаимодействию пластин с трехмерным, безвихревым, идеальным газовым потоком // Доп. НАН України. — 2013. — № 9. — С. 57—63.
2. *Аврамов К. В., Михлин Ю. В.* Нелинейная динамика упругих систем. — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. — 704 с.
3. *Аврамов К. В., Морачковский О. К., Тонконоженко А. М. и др.* Полуаналитический метод конечных элементов для расчета напряженно-деформируемого состояния цилиндрических оболочек с продольными ребрами // Пробл. машиностр. — 2014. — **17**. — С. 34—43.
4. *Аврамов К. В., Морачковский О. К., Тонконоженко А. М., Кожарин В. Ю.* Численный анализ разрушающих нагрузок оребренных баков ракетоносителей // Авиац.-космич. техн. и технол. — 2014. — № 5(112). — С. 40—47.
5. *Бочкарев С. А., Матвеенко В. П.* Панельный флаттер вращающихся круговых оболочек, обтекаемых сверхзвуковым потоком // Вычисл. мех. сплош. сред. — 2008. — № 3. — С. 25—33.
6. *Чернобрывко М. В., Аврамов К. В.* Собственные колебания параболических оболочек // Мат. методы и физ.-мех. поля. — 2014. — **4**. — Р. 18—20.
7. *Чернобрывко М. В., Аврамов К. В., Батутина Т. Я. и др.* Динамическая неустойчивость обтекателей ракетоносителей в полете // Пробл. машиностр. — 2014. — **17**. — С. 9—16.
8. *Avramov K. V., Pierre C., Shyriaieva N.* Flexural-flexural-torsional nonlinear vibrations of pre-twisted rotating beams with asymmetric cross-sections // J. Vibrat. and Contr. — 2007. — **13**. — P. 329—364.
9. *Avramov K. V., Strel'nikova E. A., Pierre C.* Resonant many-mode periodic and chaotic self-sustained aeroelastic vibrations of cantilever plates with geometrical nonlinearities in incompressible flow // Nonlin. Dyn. — 2012. — **70**. — P. 1335—1354.
10. *Breslavsky I. D., Strel'nikova E. A., Avramov K. V.* Dynamics of Shallow Shells with Geometrical Nonlinearity Interacting with Fluid // Comput. and Struct. — 2011. — **89**. — P. 496—506.
11. *Chernobryvko M. V., Avramov K. V., Romanenko V. N., et al.* Free linear vibrations of parabolic shells // Meccanica. — 2014. — **49**. — P. 14—21.
12. *Kochurov R., Avramov K. V.* On effect of initial imperfections on parametric vibrations of cylindrical shells with geometrical non-linearity // Int. J. Solids and Struct. — 2012. — **49**. — P. 537—545.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2014

К. В. Аврамов[1], М. В. Чернобривко[1], Т. Я. Батутина[2], П. Г. Дегтяренко[2], А. М. Тонконоженко[2]

[1] Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків
[2] Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ДИНАМІЧНА НЕСТІЙКІСТЬ ОБТІЧНИКІВ РАКЕТ

Розглядаються аеропружні коливання обтічників ракетносіїв, які є параболічними або конічними оболонками. Такі оболонки посилюються зсередини стрингерами і шпангоутами. Досліджується динамічна нестійкість таких конструкцій в надзвуковому газовому потоці, який описується поршневою теорією.

Ключові слова: коливання обтічника, конічна оболонка зі шпангоутами, надзвуковий газовий потік, просторова форма втрати стійкості.

K. V. Avramov[1], M. V. Chernobryvko[1], T. Ya. Batutina[2], P. G. Degtyarenko[2], A. M. Tonkonozhenko[2]

[1] A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
[2] Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

DYNAMIC INSTABILITY OF ROCKETS FAIRINGS

Aeroelastic vibrations of rockets fairing, which are parabolic or conic shells, are considered. These shells are faded-in by stringers and rings. The dynamic instability of such structures in supersonic gas stream is analyzed.

Key words: vibrations of rocket deflector, ring-stiffened conical shells, supersonic gas stream, shell space mode.