

УДК 539.3:534.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ СЛОЖНОМ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

И.К. ТУРКИН, Д.А. РОГОВ

В статье исследуется динамическое поведение неравномерно нагретой тонкостенной конической оболочки вращения типа обтекателя летательного аппарата в условиях нагружения ударной волной в газовой среде, аппроксимируемой подвижной нагрузкой. Перемещения оболочки, возникающие в результате предварительного неравномерного нагрева, определяются из решения уравнений термоупругого равновесия. Решение динамической задачи состоит в интегрировании нелинейных уравнений движения оболочки при заданных начальных смещениях, нулевых начальных скоростях и граничных условиях, соответствующих закреплению обтекателя. В результате решения представленной задачи определяются амплитуды колебаний носка обтекателя. Это позволяет определять напряженно-деформированное состояние оболочки в целях определения ее несущей способности.

Ключевые слова: обтекатель, оболочка, летательный аппарат, термосиловое нагружение.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема динамической прочности считается одной из главных при создании высоконадежных конструкций ЛА, работающих в условиях высокоинтенсивного нагрева и нестационарных динамических возмущений со стороны внешней среды.

1. СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ

Исследуется неравномерно нагретая тонкостенная коническая оболочка вращения типа обтекателя ЛА в условиях динамического нагружения ударной волной в газе, аппроксимируемой подвижной нагрузкой. В данной области основные результаты получены для задач динамической устойчивости оболочек, подверженных комплексному силовому нагружению [2, 3, 5, 6].

В рассматриваемой задаче исследуется взаимодействие конической оболочки вращения, предварительно односторонне нагретой до заданной температуры, изменяющейся по окружности по закону [6] $T(\varphi) = T_0 + T_0 \cos \varphi$ (T_0 – начальная температура нагрева, φ – угол, отсчитываемый по окружности от горизонтального сечения оболочки), с подвижной нагрузкой, распространяющейся вдоль оси симметрии. Перемещения оболочки, возникающие в результате нагрева, определяются из решения уравнений термоупругого равновесия [4]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} (N_1 - \theta Q) + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} (N_1 - N_2 - \theta Q) + \frac{1}{R_1} (Q + \theta N_1) &= 0, \\ \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} (Q + \theta N_1) + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} (Q + \theta N_1) + \frac{1}{R_1} (N_1 - \theta Q) - \frac{N_2}{R_2} &= 0, \\ -\frac{1}{A} \frac{\partial M_1}{\partial \alpha} - \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} (M_1 - M_2) + \frac{1}{R_2} (M_2 \theta) + Q &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $\theta = \frac{1}{A} \frac{\partial \omega}{\partial \alpha} - \frac{U}{R_1}$; $A^2 = \frac{\partial r_0}{\partial \alpha} \frac{\partial r_0}{\partial \alpha}$; $B^2 = \frac{\partial r_0}{\partial \beta} \frac{\partial r_0}{\partial \beta}$, радиус r_0 точки О поверхности оболочки определяется двумя координатами α – вдоль меридиана и β – вдоль параллели;

$$\begin{aligned}
N_1 &= D_0 [(E_1 + \mu E_2) - \alpha_T (1 + \mu) T(\phi)]; & M_1 &= -D(\xi_1 + \mu \xi_2); \\
N_2 &= D_0 [(E_1 + \mu E_2) - \alpha_T (1 + \mu) T(\phi)]; & M_2 &= -D(\mu \xi_1 + \xi_2); \\
D_0 &= \frac{Eh}{(1 - \mu^2)}; & Q &= \frac{\pi^2 D_0}{24} (1 - \mu) E_{1z}; & D &= \frac{Eh^3}{(1 - \mu^2)},
\end{aligned} \tag{2}$$

где α_T – температурный коэффициент линейного расширения материала оболочки E , E_1 , E_2 , E_{1z} – модули упругости материала.

Предполагается, что жестко закрепленные торцы оболочки теплоизолированы и соединены продольным стрингером. Это дает возможность принять однородные граничные условия по продольным U_T , поперечным W_T перемещениям и повороту Φ_T прямолинейного элемента, нормального к срединной поверхности недеформированной оболочки:

$$U_T = W_T = \Phi_T = 0. \tag{3}$$

Принимается также, что перемещения оболочки от теплового нагружения достаточно малы по сравнению с ее толщиной и для их определения можно использовать уравнения линейной теории оболочек.

Для решения задачи термоупругого равновесия используется комплексный метод, предложенный в работе [7]. Разрешающая система уравнений (1) для конической оболочки решается следующим образом: вводятся функции

$$\begin{aligned}
F_1 &= \alpha \sin \gamma \cos \gamma \bar{N}_1 = \frac{iK_0}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} \alpha \cos^2 \gamma \frac{dF_2}{d\alpha}, \\
F_2 &= \bar{N}_1 + \bar{N}_2,
\end{aligned} \tag{4}$$

зависящие от комплексных усилий

$$\begin{aligned}
\bar{N}_1 &= N_1 - ik_0 \sqrt{\frac{1 - \mu^2}{12}} \xi_1^0; & i &= \sqrt{-1}; \\
\bar{N}_2 &= N_2 - ik_0 \sqrt{\frac{1 - \mu^2}{12}} \xi_2^0; & \xi_1^0 &= R\xi_1; & \xi_2^0 &= R\xi_2
\end{aligned}$$

где γ – угол между нормалью к образующей и осью симметрии, $\xi_1 = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta}{\partial \alpha}$; $\xi_2 = \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta$. В этом случае система (1) сводится к следующей форме:

$$\begin{aligned}
\frac{dF_1}{d\alpha} &= 0; \\
-\frac{iK_0}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} G[F_2] + F_2 - \frac{F_1}{\alpha \sin \gamma \cos \gamma} &= 0; \\
G[y] &= \text{ctg} \frac{1}{\alpha} \frac{d}{d\alpha} \left(\alpha^2 \frac{dy}{d\alpha} \right)
\end{aligned} \tag{5}$$

Комплексные усилия определяются из решения этой системы, а затем используются соотношения Гука в комплексной форме.

$$\begin{aligned}
 U_T &= \alpha_T T(\phi) \left[(\alpha - \alpha_0) + \frac{\alpha_n - \alpha_0}{\ln \frac{\alpha_n}{\alpha_0}} \ln \frac{\alpha}{\alpha_0} \right]; \\
 W_T &= \alpha_T T(\phi) ctg \gamma \left\{ \left[\alpha_0 + \frac{\alpha_n - \alpha_0}{\ln \frac{\alpha_n}{\alpha_0}} (\mu + \mu^2 + \ln \frac{\alpha}{\alpha_0}) \right] + \right. \\
 &\quad \left. \alpha \left[e^{-\beta_1} A_1 (\cos \beta_1 + \sin \beta_1) + e^{-\beta_2} A_2 (\cos \beta_2 + \sin \beta_2) \right] \right\}, \quad (6) \\
 \Phi_T &= \sqrt{\frac{\alpha}{2C_0 t g \gamma}} \left\{ \frac{e^{-\beta_1} [(A_1 + B_1) \cos \beta_1 + (A_1 - B_1) \sin \beta_1] -}{e^{-\beta_2} [(A_2 + B_2) \cos \beta_2 + (A_2 - B_2) \sin \beta_2]} \right\} + \frac{A}{\alpha \sin^2 \gamma},
 \end{aligned}$$

где $\beta_1 = \sqrt{\frac{2tg\gamma}{C_0}}(\sqrt{\alpha} - \sqrt{\alpha_0})$, $\beta_2 = \sqrt{\frac{2tg\gamma}{C_0}}(\sqrt{\alpha_n} - \sqrt{\alpha})$, $C_0 = \frac{K_0}{\sqrt{12(1-\mu^2)}}$, A_1, A_2, B_1, B_2 –

постоянные коэффициенты.

Таким образом, полученные соотношения (6) являются решением статической задачи нагрева оболочки при граничных условиях (3) и определяют температурные перемещения с точностью $\sqrt{\frac{h}{R_0}}$ (где h – толщина оболочки; R_0 – радиус меньшего основания конической оболочки). Это решение выбирается в качестве начальных условий динамической задачи по координатам.

Решение динамической задачи ищется по алгоритму, предложенному в работе [1] при начальных смещениях, определяемых в виде (1.6) и нулевых начальных скоростях, а также при граничных условиях (1.3). Подвижная нагрузка задается выражением [6]

$$P(x, t) = \Phi(bt - x)H(bt - x), \quad (7)$$

где функция $\Phi(bt - x)$ характеризует величину суммарного давления; $H(bt - x)$ – функция Хевисайда; x – координата вдоль оси симметрии оболочки; t – время; b – скорость распространения подвижной нагрузки.

В результате численного решения найдены статические продольные U_T и поперечные W_T смещения оболочки при нагреве, который приводит к ее выпучиванию. Последующее воздействие подвижной нагрузки вызывает соответствующие прогибы оболочки. Также определены с выбранным шагом по времени поперечные перемещения носка конуса при заданном термосиловом нагружении.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНИЧЕСКУЮ ОБОЛОЧКУ

Рассмотрено нагружение тонкостенной конической оболочки давлением, прикладываемым неравномерно распределенным по внешней поверхности конуса. Максимум давления при-

ложен на «наветренной», минимум – на «подветренной» сторонах для имитации условий воздействия набегающего потока. Промежуточные значения величины давления интерполируются по закону косинуса в зависимости от окружной координаты.

Воздействие давления представлено в виде кратковременного импульса, показанного на рис. 1. Одновременно с импульсным воздействием внешнего давления в расчете напряженно-деформированного состояния учитывался возможный нагрев наветренной стороны оболочки.

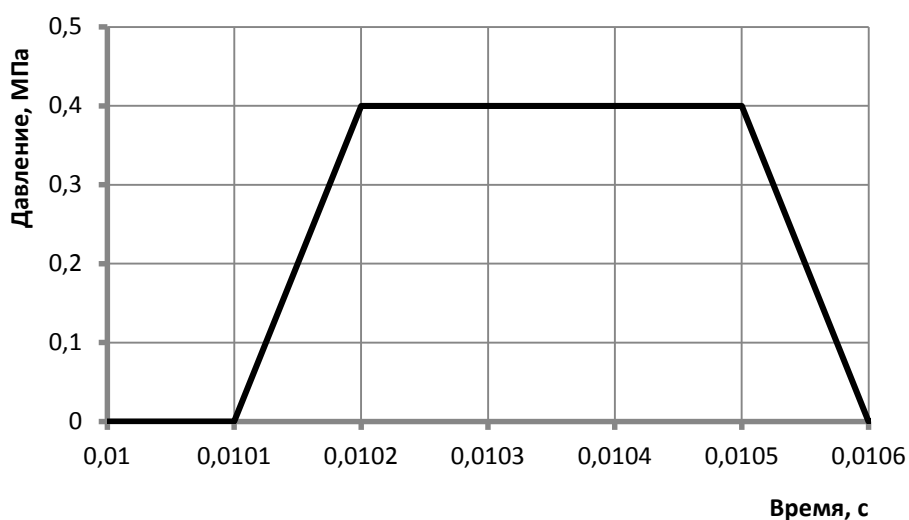


Рис. 1. Воздействие давления

Для сравнения на рис. 2 и 3 показаны временные зависимости перемещений носка в поперечном направлении, возникающих в данной оболочке. Результаты расчета представлены для конической оболочки диаметром 200 мм с удлинением $\lambda = 3$. Рассмотрено нагружение оболочки толщиной 0,5; 1, 2 и 5 мм. На рис. 2 приведены изменения перемещений оболочки в поперечном направлении с постоянной (100 °С) температурой стенки, на рис. 3 – для переменной по окружности температуры стенки. Температура стенки принимает значения от 150 °С на наветренной до 50 °С на подветренной сторонах соответственно.

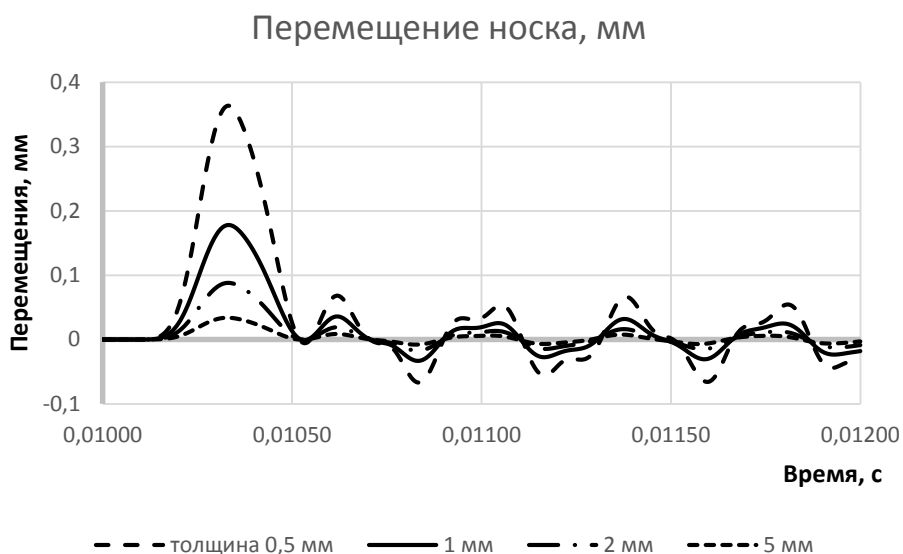


Рис. 2. Временные зависимости перемещений носка

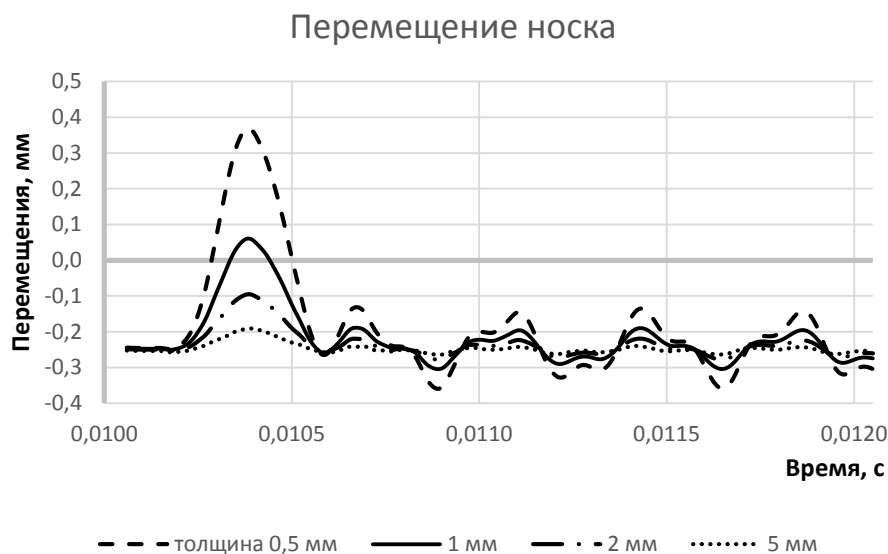


Рис. 3. Временные зависимости перемещений носка

На рис. 4 представлена зависимость перемещений носка оболочки в поперечном направлении от времени при условии неравномерного нагрева стенки ($50 \div 150$ °С) и амплитуды импульса давления 1 МПа.

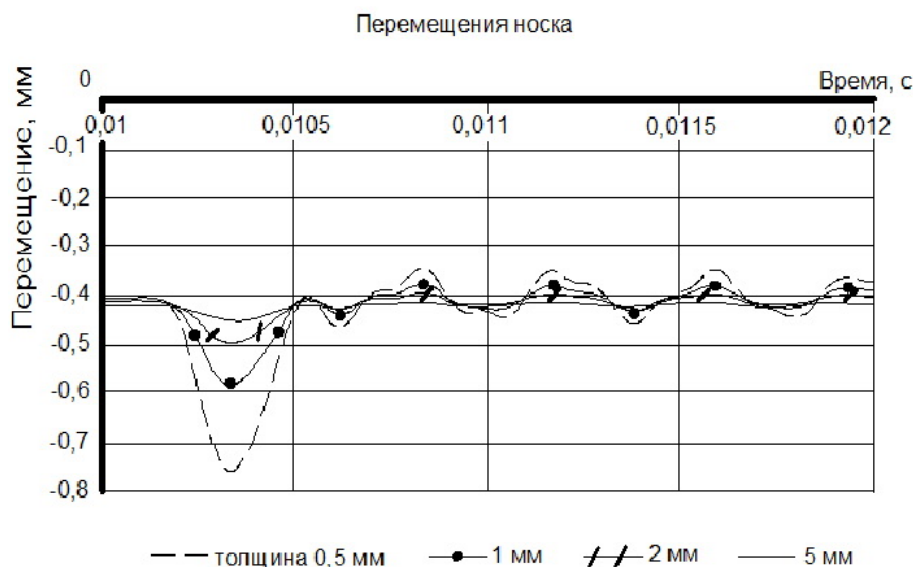


Рис. 4. Зависимость перемещений носка оболочки в поперечном направлении

Из графиков следует, что в первый момент времени действия импульса давления происходит значительный всплеск амплитуды колебаний носка обтекателя. В дальнейшем происходит затухание колебаний. Представленные результаты решения задачи динамического поведения конического обтекателя при сложном термосиловом нагружении позволяют оценивать несущую способность агрегатов ЛА при проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондарев М.Е., Сафронов В.С., Туркин И.К.** Нестационарное взаимодействие носовых отсеков ЛА с ударной волной // *Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений: Материалы Международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов им. П.А. Соловьева и В.Н. Кондратьева*. Рыбинск: РГАТА, 2006. Ч. 3. 196 с.
2. **Ганеева М.С.** Изгиб цилиндрической панели под действием неравномерного нормального давления и температуры // *Исследования по теории пластин и оболочек*. Сб. № 2. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1964. С. 159–167.
3. **Кабанов В.В.** Устойчивость цилиндрической оболочки при сжатии, боковом давлении и нагреве // *Тепловые напряжения в элементах конструкции*. Вып. № 4. Киев: Наукова думка, 1974. С. 129–132.
4. **Подстригач Я.С., Швец Р.Н.** Термоупругость тонких оболочек. Киев: Наукова думка, 1976. 344 с.
5. **Туркин И.К.** Динамическая устойчивость подкрепленной цилиндрической оболочки при термосиловом нагружении // *Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции «Современные проблемы строительной механики и прочностей ЛА»*. Харьков, 1991. С. 75.
6. **Туркин И.К.** Проектирование тонкостенных конструкций ЛА, функционирующих в экстремальных условиях. М.: Изд-во МАИ, 2000. 304 с.
7. **Чернова Н.Д.** Реакция конической оболочки на действие подвижной нагрузки с учетом предварительного нагрева. Деп. ВИНТИ 18.02.1983., № 917-83.

STUDY OF THE AIRCRAFT CONICAL FAIRING DYNAMIC BEHAVIOUR UNDER COMBINED OF TEMPERATURE AND FORCE LOADING

Turkin I.K., Rogov D.A.

The article deals with the dynamic behavior of the unevenly heated thin-walled conical shell of revolution of the aircraft fairing type under the loading conditions by shock wave in the gaseous environment, approximated by travelling load. The displacements of the shell, resulting from the preliminary uneven heating, are determined from the solution of the equations of thermoelastic equilibrium. Solution of the dynamic problem consists of the integration of the nonlinear equations of shell motion at the assigned initial displacement, zero initial velocities and boundary conditions, corresponding to the fastening of fairing. As a result of the solution of the presented problem the amplitudes of the fluctuations of the fairing nose edge are determined. It allows to determine the stress-strained state of shell for the purposes of the determination of its bearing capacity.

Key words: fairing, shell, aircraft, temperature and force loading.

REFERENCES

1. **Bondarev M.E., Safronov V.S., Turkin I.K.** Nestacionarnoe vzaimodejstvie nosovyh otsekov LA s udarnoj volnoj. Aviacionnaja i raketno-kosmicheskaja tehnika s ispol'zovaniem novyh tehniceskikh reshenij. Materialy mezhdunarodnoj shkoly konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov im. P.A. Solov'eva i V.N. Kondrat'eva. Rybinsk: RGATA, 2006. Ch. 3. 196 s.
2. **Ganeeva M.S.** Izgib cilindricheskoj paneli pod dejstviem neravnomernogo normal'nogo davlenija i temperatury. V sb. Issledovanija po teorii plastin i obolochek. № 2. Kazan': Kazanskij un-t, 1964. S. 159–167.
3. **Kabanov V.V.** Ustojchivost' cilindricheskoj obolochki pri szhatii, bokovom davlenii i nagreve. V sb.: Teplovyje nagruzhenija v jelementah konstrukcii. Vyp. № 4. Kiev: Naukova dumka, 1974. S. 129–132.
4. **Podstrigach Ja.S., Shvec R.N.** Termouprugost' tonkih obolochek. Kiev: Naukova dumka, 1976. 344 s.

5. Turkin I.K. Dinamicheskaja ustojchivost' podkrepljennoj cilindricheskoj obolochki pri termosilovom nagruženii. Tezisy dokladov IV Vsesojuznoj konferencii «Sovremennye problemy stroitel'noj mehaniki i prochnostej LA». Har'kov, 1991. S. 75.

6. Turkin I.K. Proektirovanie tonkostennyh konstrukcij LA, funkcionirujushhijh v jekstremal'nyh uslovijah. M.: Izd-vo MAI, 2000. 304 s.

7. Chernova N.D. Reakcija konicheskoj obolochki na dejstvie podvizhnoj nagruzki s uchetom predvaritel'nogo nagreva. Dep. VINITI 18.02.1983., № 917-83.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Туркин Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Авиационно-ракетные системы» (каф. 602) МАИ, kafedra_602@mail.ru.

Рогов Дмитрий Александрович, аспирант кафедры 602 МАИ, начальник сектора расчетов прочности и надежности ОА «ОНПП «Технология», rogov.dmitry.76@yandex.ru.