

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-71-80

**Динамическое поведение упругой оболочки вращения
параболической формы с жесткой носовой вставкой
под действием подвижной нагрузки**

И.К. Туркин¹, Д.А. Рогов², В.А. Грачев²

¹Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

²АО «ОНПП “Технология”» им. А.Г. Ромашина ГНЦ РФ, г. Обнинск, Россия

Аннотация: Материалы статьи содержат результаты оценки напряженно-деформированного состояния, внутренних эквивалентных сил и моментов упругой оболочки вращения параболической формы при ее динамическом нагружении подвижным фронтом избыточного давления, распространяющегося вдоль оси симметрии. Носовая часть оболочки подкреплена изнутри жесткой параболической вставкой. Наличие массивного объекта (носовой вставки) в динамической системе вносит дополнительные возмущения в процесс нестационарного распространения возмущений в тонкостенной оболочке. Параметры взаимодействия ударной волны с поверхностью конструкции сильно локализованы, так как характерное время течения процесса не превышает 20 миллисекунд. Величина действующей подвижной нагрузки на оболочку определяется функцией величины суммарного давления, скорректированной с помощью функции Хевисайда. Приведены результаты расчета для варианта заделки (жесткого закрепления) торца оболочки на неподвижной ответной части. Значения внутренних силовых факторов для оболочек с тремя вариантами исполнения – толщиной 3, 5 и 7 мм, представлены в безразмерном виде. В качестве иллюстраций показаны зависимости от времени, прошедшего с начала взаимодействия с ударной волной носовой части, для внутренних усилий и изгибающих моментов. Характер распространения упругих возмущений в стенке определяется их наложением и переотражением, характер и амплитуда волн которых зависят от конфигурации самой стенки, условий закрепления и параметров действия внешнего избыточного давления. Также даны результаты расчета распределения силовых факторов по длине тонкостенной оболочки в моменты времени достижения ими максимальных значений в абсолютных величинах. Характер общего формоизменения конструкции может быть получен при анализе завершающего графика, на котором показаны изменения по времени значений перемещений жесткой носовой части в продольном направлении.

Ключевые слова: оболочка, жесткая носовая часть, ударная волна, напряженно-деформированное состояние, перемещения.

Для цитирования: Туркин И.К., Рогов Д.А., Грачев В.А. Динамическое поведение упругой оболочки вращения параболической формы с жесткой носовой вставкой под действием подвижной нагрузки // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 71–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-71-80

**Reaction of the loaded shell of rotation with the rigid nose
of the apparatus to a shock wave in a liquid**

I.K. Turkin¹, D.A. Rogov², V.A. Grachev²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

²JSC ORPE “Technologiya” named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

Abstract: The materials of the article contain the results of an assessment of the stress-strain state, internal equivalent forces and moments of an elastic shell of rotation of a parabolic shape under its dynamic loading by a moving excess pressure front propagating along the axis of symmetry. The nasal part of the shell is reinforced from the inside by a rigid parabolic insert. The presence of a massive object (nose insert) in a dynamic system introduces additional disturbances into the process of unsteady propagation of disturbances in a thin-walled shell. The parameters of the interaction of the shock wave with the surface of the structure are highly localized, as typical time of the process does not exceed 20 milliseconds. The magnitude of the acting moving load on the shell is determined by the function of the total pressure, adjusted using the Heaviside function. The calculation results are given for the option of sealing (rigid fastening) the end of the shell on a fixed mating part. The values of the internal force factors for shells with three versions – 3, 5 and 7 mm thick – are presented in a dimensionless form. The illustrations show the dependences on the time elapsed since the beginning of interaction with the shock wave of the bow for internal forces and bending moments. The nature of the propagation of elastic perturbations in the wall is determined by their superposition and re-reflection, the nature and amplitude of the waves of which depend on the configuration of the wall itself, the conditions of fixation and the parameters of the action of external overpressure. The results of calculating the distribution of force factors along the length of a thin-walled shell at the time when they reach their maximum values in absolute terms are also given. The nature of the overall design change can be obtained by analyzing the final graph, which shows the time changes in the values of the movements of the rigid nose in the longitudinal direction.

Key words: shell, rigid nose, shock wave, stress-strain state, displacement.

For citation: Turkin, I.K., Rogov, D.A., Grachev, V.A. (2025). Reaction of the loaded shell of rotation with the rigid nose of the apparatus to a shock wave in a liquid. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 71–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-71-80

Введение

Динамическое или импульсное нагружение конструкций вызывает распространение волн деформирования, образующих области возмущений, каждая точка которых характеризуется сильной неоднородностью полей напряженно-деформированного состояния (НДС) материала. При высокоинтенсивном и быстропротекающем нагружении в элементах конструкции могут возникать локализованные зоны напряжений, величина которых может вызвать разрушение данной части, независимо от того, как нагружена остальная часть конструкции. Точная оценка взаимодействия ударной волны и вызванное этим взаимодействием НДС всей упругой оболочки вращения, включающее в себя нестационарные колебания жесткой носовой части, имеет важное значение при разработке эффективных и надежных высокоскоростных летательных аппаратов, эксплуатирующихся в жидкости и газе, что неоднократно подчеркивалось в работах [1–7].

Оценка зависимостей напряжений, деформаций и общего формоизменения – перемещений стенки оболочки от времени в представленной ниже постановке позволяет определять

работоспособность и функционирование конструкции упругого параболоида вращения (оболочки), включающего в носовой части жесткую вставку, при указанном нагружении. Полученные результаты позволяют улучшить алгоритмы проектирования элементов перспективных аппаратов, функционирующих в условиях аэрогидродинамического нагружения и ударного воздействия от внешней среды.

Постановка задачи, метод решения

В представленной работе рассматривается модель взаимодействия плоской ударной волны (подвижной нагрузки) с носовой частью летательного аппарата, представляющая собой тонкостенную оболочку вращения, первоначально находящуюся в свободном, ненагруженном состоянии. Конструкция рассматриваемого элемента, включающая в себя жесткую подкрепляющую вставку, находящуюся в жестком параболическом экране, показана на рис. 1. Принятые в расчете обозначения: f – фокальный параметр, α_0 – угол между нормалью к поверхности и осью симметрии в сечении начала тонкостенной части конструкции, x_0 – длина жесткой носовой вставки по

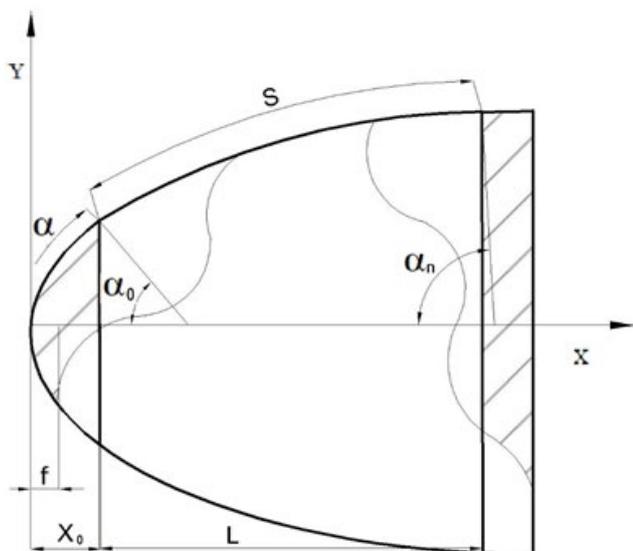


Рис. 1. Параболическая оболочка с жесткой носовой частью

Fig. 1. A parabolic shell with a rigid nose

продольной координате, x_n – длина тонкостенной части конструкции по продольной координате, α_n – угол между нормалью к поверхности и осью симметрии в сечении окончания тонкостенной части конструкции, L – осевая длина оболочки, S – координата по образующей криволинейной поверхности тонкостенной части. В области от α_0 до α_n основные результаты оценки НДС получены для задач о движении в газообразной среде тел произвольной формы под действием движущегося фронта давления волны. Исходные положения и теоретическая проработка представлены в работах [8–18].

Уравнения внешнего обвода оболочки, перемещения, деформации и напряжения, возникающих в ее стенке, определяются зависимостями, представленными следующим образом.

Уравнение образующей внешней поверхности оболочки в прямоугольной системе координат описывается выражением

$$y^2 = 2fx. \quad (1)$$

В качестве основных параметров, определяющих геометрию срединной поверхности параболической оболочки, принимаются фокальный параметр f , углы между нормалью к поверхности и осью симметрии в носовой и торцевой частях оболочки – α_0 и α_n . Текущие

радиусы кривизны оболочки R_1 , R_2 и параметры Ламе A и B с учетом f удовлетворяют следующим соотношениям:

$$R_1 = \frac{f}{\alpha}; R_2 = \frac{f}{\cos \alpha}; k_\alpha = \alpha; k_\beta = \cos \alpha; A = \frac{f}{\alpha}; B = f \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где α – безразмерная координата по меридиональному направлению, k_α и k_β – безразмерные кривизны координатных линий на срединной поверхности. Здесь и далее за характерный размер оболочки принят фокальный параметр параболы (1), равный радиусу кривизны оболочки в вершине.

Безразмерные компоненты деформаций срединной поверхности оболочки с учетом геометрических параметров (2) имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \alpha(U' + W) + \frac{\theta^2}{2}; \quad \varepsilon_2 = U + k_\beta W; \\ \varepsilon_{1z} &= \alpha(W' + U) - \Phi; \\ \varkappa_1 &= \Phi' \alpha; \quad \varkappa_2 = \frac{\alpha}{\sin \alpha} \Phi, \end{aligned} \quad (3)$$

где U , W – продольные и поперечные перемещения, θ – угол поворота нормали срединной поверхности при деформации, Φ – угол наклона прямолинейного волокна относительно нормали срединной поверхности оболочки до деформации (характеристика депланации).

Соотношения для продольных усилий в срединной поверхности оболочки $N_{1,2}$ изгибающих моментов $M_{1,2}$ и перерезывающей силы Q , выраженные в безразмерных величинах, представляются в форме

$$\begin{aligned} N_1 &= (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \quad N_2 = (\mu \varepsilon_1 + \varepsilon_2); \\ M_1 &= -\varkappa_1 - \mu \varkappa_2; \quad M_2 = -\mu \varkappa_1 - \varkappa_2; \\ Q &= \frac{\pi^2}{24} (1 - \mu) \varepsilon_{1z}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь соотношения между безразмерными и размерными силовыми факторами следующие:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{N_i}{D_0}; \quad M_i = \frac{f M_i}{D} (i = 1, 2); \quad Q = \frac{Q}{D_0}; \\ D_0 &= \frac{Eh}{1 - \mu^2}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга) и μ – коэффициент Пуассона материала оболочки, h – толщина оболочки.

Величина действующей подвижной нагрузки на оболочку определяется согласно

$$P(x, t) = \Phi(bt - x) \cdot H(bt - x), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{U} &= k_1 \left[\alpha(N_1 - \theta Q)' + \frac{\alpha}{\sin \sin \alpha} (N_1 - N_2 - \theta Q) + \alpha(\theta N_1 + Q) + \frac{\theta P}{k_0} \right]; \\ \ddot{W} &= k_1 \left[\alpha(Q - \theta N_1)' + \frac{\alpha}{\sin \sin \alpha} (Q + \theta N_1) - \alpha(N_1 - \theta Q) - N_2 \cos \cos \alpha - \frac{P}{k_0} \right]; \\ \ddot{\Phi} &= k_1 \left[-\alpha(M_1)' - \frac{\alpha}{\sin \sin \alpha} (M_1 - M_2) + \cos \cos \alpha \theta M_2 + \frac{12Q}{k_0} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $k_0 = \frac{h}{R}$; $k_1 = \frac{a^2}{c^2}$; $a = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}$ – значение скорости распространения продольных возмущений в оболочке при известных величинах c – скорость распространения звуковых волн и ρ – плотность материала оболочки соответственно.

В начальный момент времени оболочка является неподвижной и ненагруженной, то есть для всех ее точек справедливы условия

$$U = W = \Phi = 0, \quad \dot{U} = \dot{W} = \dot{\Phi} = 0 \text{ при } t = 0. \quad (8)$$

При этом граничные условия на закрепленном торце имеют вид

$$U = W = \Phi = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_n. \quad (9)$$

Условия в носовой части, связанной с жесткой параболической вставкой, при $\alpha = \alpha_0$ следуют из равенства ее перемещения вдоль оси симметрии срединной поверхности оболочки. Они определяются соотношениями

$$U = \Delta \sin \alpha_0, \quad W = -\Delta \cos \alpha_0, \quad \Phi = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_0. \quad (10)$$

Перемещения жесткой вставки по продольной оси Ox определяется уравнением движения носовой части, записанным в безразмерной форме:

$$\ddot{\Delta}(\tau) = \frac{f}{Mc^2} q(\tau) + G; \quad G = \frac{2\pi f^2 D_0 G_0}{Mc^2}, \quad (11)$$

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

Осесимметричное движение оболочки при нагружении (6) можно записать относительно безразмерных величин в следующей форме:

где M – масса жесткой носовой части, $\tau = \frac{ct}{R}$ – безразмерное время.

Безразмерная реакция оболочки G_0 на смещение жесткой носовой части, отнесенная к единице длины окружности торца, имеет вид

$$G_0 = (N_1 - \theta Q) \sin \alpha_0 - (Q + \theta N_1) \cos \alpha_0. \quad (12)$$

Уравнение движения жесткой носовой части можно преобразовать к виду

$$\ddot{\Delta}(\tau) = k_1 [k_2 P_0 q^*(\tau) + k_3 G_0], \quad (13)$$

где решение Δ удовлетворяет нулевым начальным условиям $\Delta = \dot{\Delta} = 0$ при $\tau = 0$, функция $q^*(\tau)$ имеет вид

$$\begin{aligned} q^*(\tau) &= \{1 - e^{-\eta\tau} \\ \text{при } \tau \leq \frac{1}{2} tg^2 \alpha_0 &\left(e^{-\frac{\eta}{2} tg^2 \alpha_0} - 1 \right) e^{-\eta\tau} \\ \text{при } \tau > \frac{1}{2} tg^2 \alpha_0 &, \end{aligned} \quad (14)$$

а безразмерные параметры k_2 и k_3 определяются по формулам

$$k_2 = \frac{2\pi\rho f^3}{M\eta}; \quad k_3 = \frac{2\pi\rho f^3}{M} tg \alpha_0, \quad (15)$$

где η – коэффициент, характеризующий изменение нагрузки за фронтом ударной волны.

Решение задачи определения параметров НДС оболочки и движения жесткой носовой части в результате действия подвижной на-

грузки может быть представлено решением уравнений движения оболочки (7) и носовой части (14) с учетом начальных (8) и граничных (9), (10) условий.

Система уравнений интегрируется методом конечных разностей по координате и методом Курта – Ларсона по времени.

Результаты расчета динамического отклика оболочки

Результаты численного решения рассматриваемой задачи получены для параболической оболочки (рис. 1) из алюминиево-магниевого сплава АМг6 со следующими геометрическими параметрами: $f = 164$ мм, $\alpha_0 = 54,3^\circ$, $\alpha_n = 74,2^\circ$, $h = 3$ (5, 7) мм, коэффициент скорости распространения динамических возмущений $k_1 = 287,9$, $\rho/\rho^* = 1$ для ρ^* – значение плотности жесткой носовой части.

Действующая на поверхность оболочки нагрузка, представляющая собой подвижный фронт ударной волны, описывается следующим уравнением:

$$p = p_0 e^{-\eta \left(\frac{b}{c} \tau - \frac{1}{2} t g^2 \alpha \right)} \cdot H \left(\frac{b}{c} \tau - \frac{1}{2} t g^2 \alpha \right), \quad (16)$$

с параметрами $p_0 = 1$ МПа – максимальное значение давления во фронте, $\eta = 3$ и $b = c = 330$ м/с.

Зависимости основных параметров, определяющих НДС оболочки, от времени τ и меридиональной криволинейной координаты S представлены на рис. 2–5. Показаны графики изменений изгибающих моментов $M_{1,2}$, продольных усилий $N_{1,2}$ и продольных перемещений носовой части U .

Сравнение величины силовых факторов, воздействующих на оболочку толщиной $h = 3$ мм, может быть сделано из рис. 2 и 3, на которых даны временные зависимости $M_{1,2}$ и $N_{1,2}$ для корневого (α_n) и носового (α_0) сечений оболочки.

В качестве примера распределения нагружающих силовых факторов по продольной безразмерной координате S в сечениях от α_0 до α_n на рис. 4 показаны графики зависимостей $M_2(S)$ в моменты времени (1,63; 2,63; 3,24; 4,05 и 6,1 мс), на которых значения изгибающего момента достигают своих максимумов.

Рассмотрено нагружение оболочки толщиной $h = 3$ мм.

На рис. 5 для определения влияния толщины оболочки на ее НДС представлены сравнительные графики распределения по координате S максимальных изгибающих моментов M_2 с тремя вышеуказанными толщинами 3, 5 и 7 мм в моменты времени, на которых значения изгибающего момента достигают своих максимумов.

Значения перемещений в продольном направлении ($U_{\text{нос}}$) носовой жесткой вставки оболочки в зависимости от времени для вариантов с разной толщиной стенки представлены на графике рис. 6.

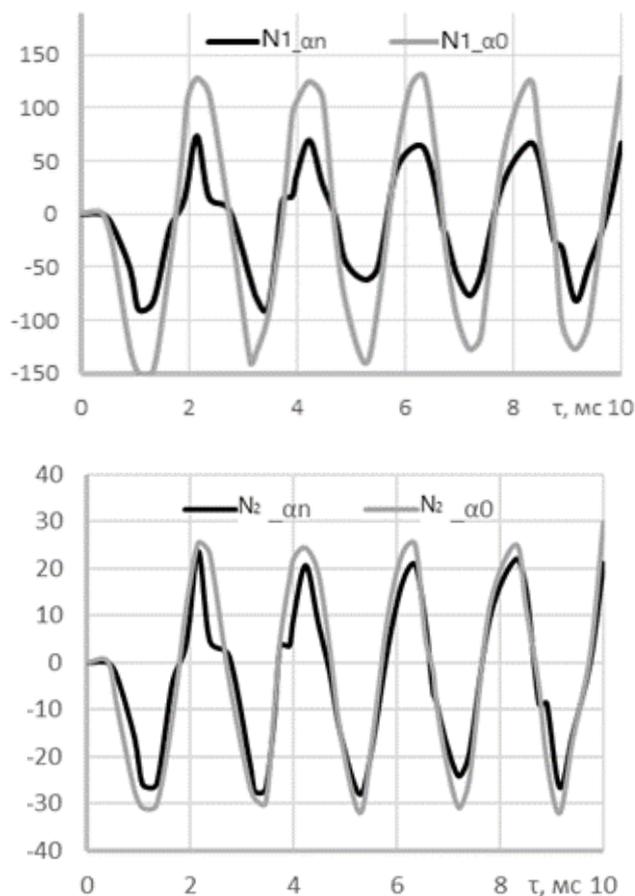


Рис. 2. Зависимость силовых факторов от времени. Продольные и поперечные усилия в срединной поверхности для носового и корневого сечений

Fig. 2. The dependence of force factors on time. Longitudinal and lateral forces in the median surface for nasal and root sections

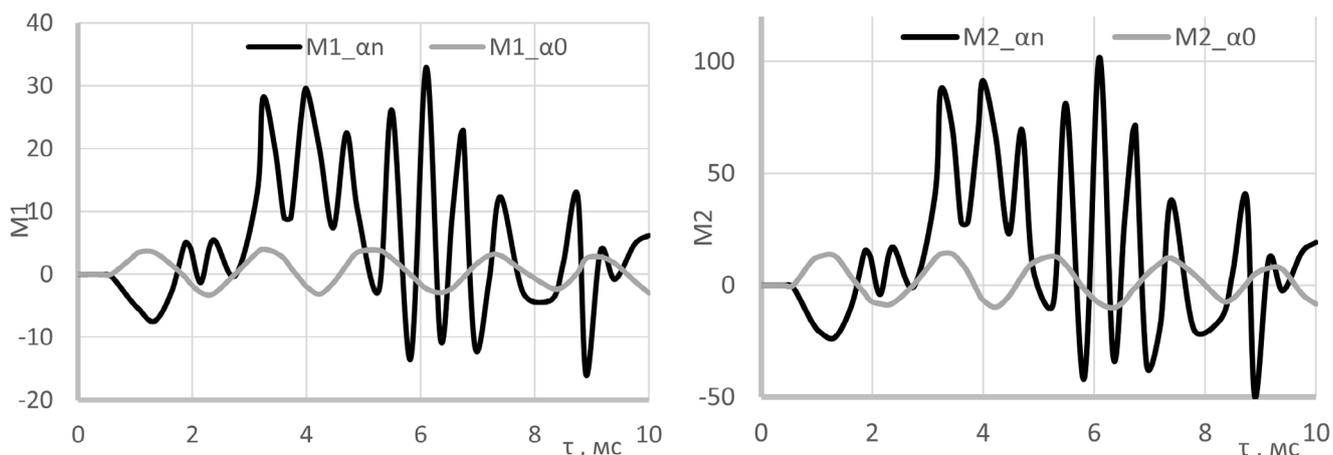


Рис. 3. Зависимость силовых факторов от времени. Изгибающие моменты для носового и корневого сечений

Fig. 3. The dependence of force factors on time. Bending moments for nasal and root sections

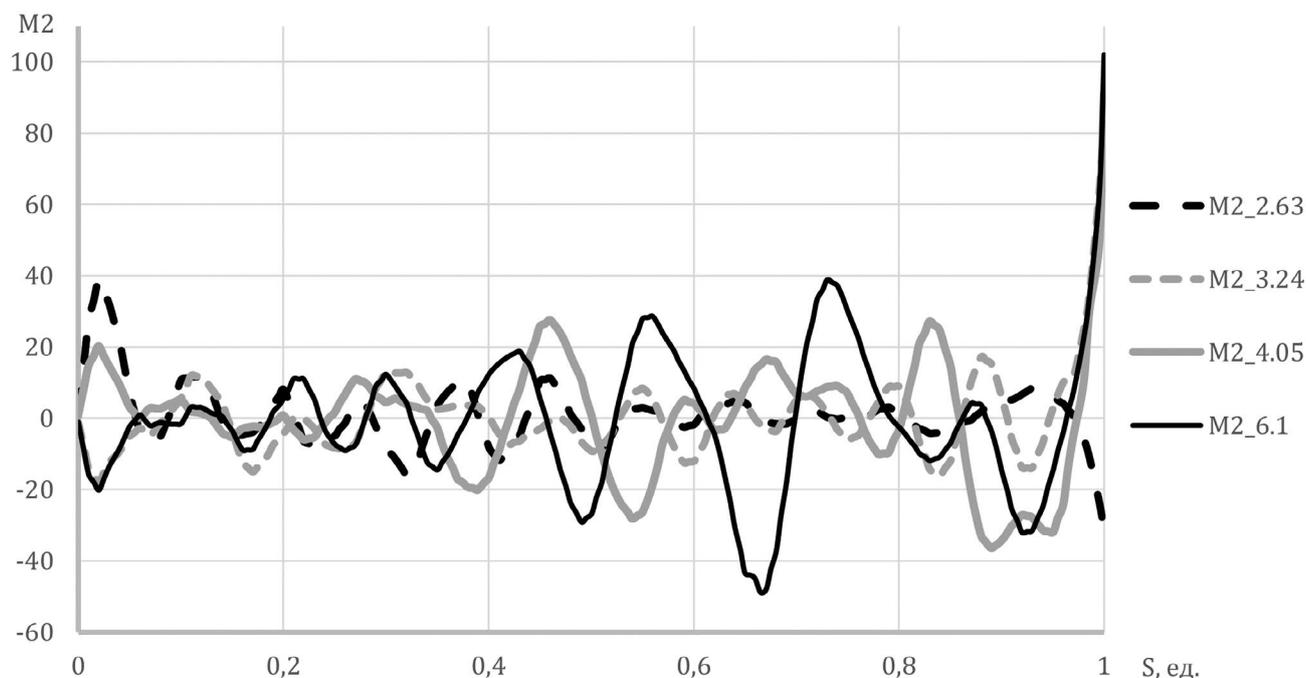


Рис. 4. Значения изгибающего момента M_2 в различные моменты времени по длине

Fig. 4. Values of bending moment M_2 at different time points along the length

Заключение

Представлены результаты оценки напряженно-деформированного состояния и внутренних эквивалентных сил и моментов упругой оболочки вращения параболической формы при ее динамическом нагружении подвижным фронтом избыточного давления, распространяющегося вдоль оси симметрии.

В ходе численного расчета определено напряженно-деформированное состояние стенки оболочки при продвижении вдоль оси симметрии ударной волны и кинематические параметры движения жесткой носовой части и самой оболочки в нескольких характерных точках. Вычислены экстремальные значения растягивающих, сжимающих напряжений, величина которых определяется значениями

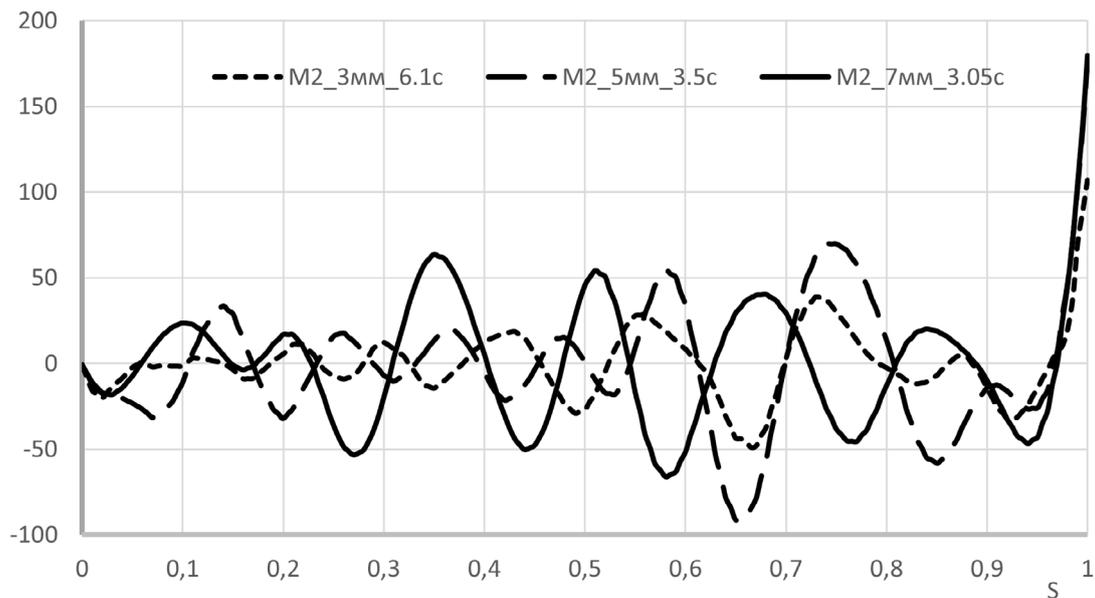


Рис. 5. Распределение по длине максимальных значений изгибающего момента M_2 для нескольких толщин стенки
Fig. 5. Length distribution of maximum bending moment values M_2 for several wall thicknesses

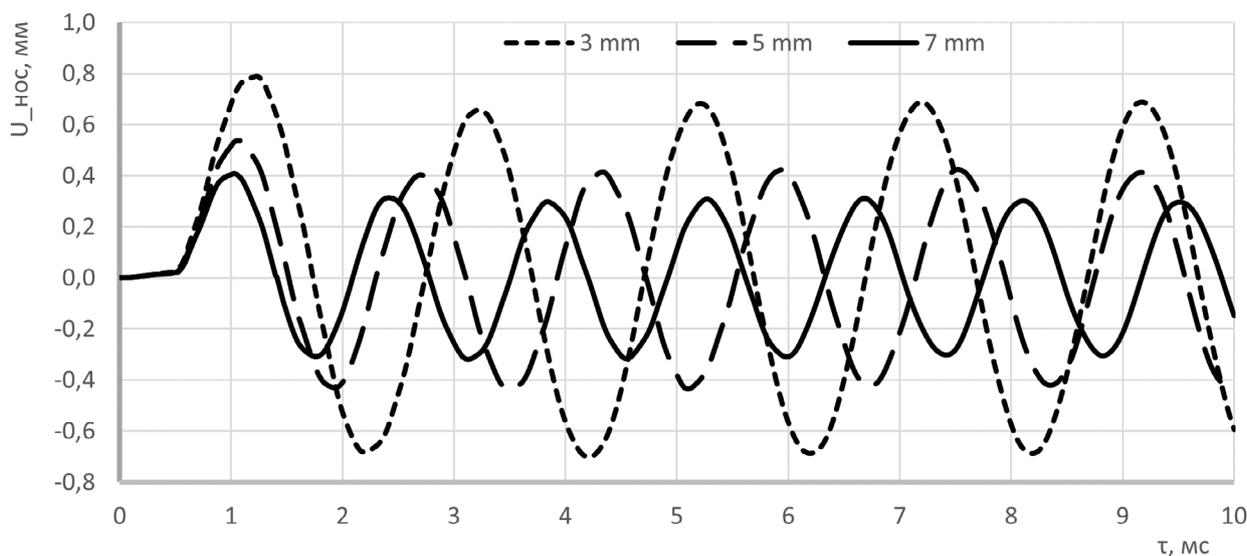


Рис. 6. Продольные перемещения U жесткой носовой вставки по времени
Fig. 6. Longitudinal movements of the U rigid nasal insert over time

продольных усилий в срединной поверхности оболочки $N_{1,2}$, изгибающих моментов $M_{1,2}$ и перерезывающей силы Q .

Список литературы

1. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсном нагружении. М.: Высшая школа, 1975. 463 с.

2. Соломенко Н.С., Абрамян К.Г., Сорокин В.В. Прочность и устойчивость пластин и оболочек судового корпуса. Л.: Судостроение, 1967. 488 с.

3. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. М.: Наука, 1975. 416 с.

4. Глушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих

композиционных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008. 432 с.

5. Ляхов В.Н., Подлубный В.В., Титаренко В.В. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций: Математическое моделирование в нестационарной газодинамике. М.: Машиностроение, 1989. 392 с.

6. Гостев А.Н. Исследование ударного взаимодействия оболочек вращения с идеальной жидкостью // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 138. С. 245–247.

7. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 294 с.

8. Григолюк Э.И., Кузнецов Е.Б. Коническая оболочка под воздействием слабой ударной волны // Доклады АН СССР. 1976. Т. 230, № 2. С. 300–301.

9. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. 387 с.

10. Новожилов В.В. О перемещении твердого тела под действием акустической волны давления // Прикладная математика и механика. 1959. Т. 23, вып. 4. С. 794–796.

11. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие слабых ударных волн с упругими конструкциями // Научные труды ИМ МГУ. 1971. № 13. С. 180.

12. Гузь А.Н., Кубенко В.А. Дифракция упругих волн. Киев: Наукова думка, 1978. 307 с.

13. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Определение гидродинамических нагрузок при взаимодействии слабых нестационарных волн давления с упругими оболочками // Колебания, излучение и демпфирование упругих структур: сборник докладов. М.: Наука, 1973. С. 3–11.

14. Туркин И.К. Исследование взаимодействия упругой оболочки вращения аппарата с ударной волной в жидкости // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов XXIII Международной научной конференции. Евпатория 01–08 июля 2018 г. М.: МАИ, 2018. С. 95–96.

15. Туркин И.К. Исследование реакции оболочки вращения аппарата с конструктивным элементом в носовой части на ударную волну в жидкости // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: сборник трудов XXVI Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Вятчи, 16–20 марта 2020 г. М.: ООО ТРП, 2020. Т. 1. С. 223–224.

16. Чернова Н.Д. Реакция параболоида вращения с жесткой носовой частью на действие ударной волны // Научные труды ИМ МГУ, 1984. С. 43–50.

17. Туркин И.К. Взаимодействие предварительно нагруженной оболочки вращения с ударной волной в жидкости // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 137–144.

18. Туркин И.К. Исследование динамического поведения параболической оболочки ЛА с конструктивной массой внутри при термосиловом нагружении // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 15–19 мая 2023 г. М.: ООО ТРП, 2023. Т. 1. С. 206–207.

References

1. Ionov, V.N., Ogibalov, P.M. (1975). Stresses in bodies under impulse loading. Moscow: Vyshaya shkola, 463 p. (in Russian)

2. Solomenko, N.S., Abramyan, K.G., Sorokin, V.V. (1967). Strength and stability of plates and shells of ship hull. Leningrad: Sudostroyeniye, 488 p. (in Russian)

3. Volmir, A.S. (1975). Shells in liquid and gas flow. Aeroelasticity problems. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian)

4. Glushko, S.K., Nemirovsky, Yu.V. (2008). Direct and inverse problems of elastic composite plates and revolution shells mechanics. Moscow: Fizmatlit, 432 p. (in Russian)

5. Lyakhov, V.N., Podlubnyy, V.V., Titarenko, V.V. (1989). Impact of shock waves and jets on structural elements: Mathematical model-

ing in unsteady gas dynamics. Moscow: Mashinostroyeniye, 392 p. (in Russian)

6. **Gostev, A.N.** (2009). Research of shock interaction of covers of rotation with the ideal liquid. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 138, pp. 245–247. (in Russian)

7. **Glushak, B.L., Kuropatenko, V.F., Novikov, S.A.** (1992). Study of material strength under dynamic loads. Novosibirsk: Nauka, 294 p. (in Russian)

8. **Grigolyuk, E.I., Kuznetsov, E.B.** (1976). Conical shell under the action of a weak shock wave. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, vol. 230, no. 2, pp. 300–301. (in Russian)

9. **Zamyshlyayev, B.V., Yakovlev, Yu.S.** (1967). Dynamic loads at underwater explosion. Leningrad: Sudostroyeniye, 387 p. (in Russian)

10. **Novozhilov, V.V.** (1959). On the movement of rigid body under acoustic pressure wave. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, vol. 23, issue 4, pp. 794–796. (in Russian)

11. **Grigolyuk, E.I., Gorshkov, A.G.** (1971). Interaction of weak shock waves with elastic structures. *Nauchnyye Trudy IM MGU*, no. 13, p. 180. (in Russian)

12. **Guz, A.N., Kubenko, V.A.** (1978). Diffraction of elastic waves. Kiev: Naukova dumka, 307 p. (in Russian)

13. **Grigolyuk, E.I., Gorshkov, A.G.** (1973). Determination of hydrodynamic loads caused by interaction between pressure's faint non-stationary waves and elastic structures. In: *Kolebaniya, izlucheniye i dempfirovaniye uprugikh struktur: sbornik dokladov*. Moscow: Nauka, pp. 3–11. (in Russian)

14. **Turkin, I.K.** (2018). Research of interaction between an elastic shell of a device rotation and a shock wave in a liquid. In: *Sistemnyy analiz, upravleniye i navigatsiya: tezisy dokladov XXIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Moscow: MAI, pp. 95–96. (in Russian)

15. **Turkin, I.K.** (2020). Research of the reaction of the apparatus rotation shell with the structural element in the nose part to the shock wave in the liquid. In: *Dinamicheskiye i tekhnologicheskiye problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred: sbornik trudov XXVI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova*. Moscow: OOO TRP, vol. 1, pp. 223–224. (in Russian)

16. **Chernova, N.D.** (1984). Rotation paraboloid reaction with a rigid nose part to the shock wave action. *Nauchnyye Trudy IM MGU*, pp. 43–50. (in Russian)

17. **Turkin, I.K.** (2022). Interaction of a preloaded elastic shell of revolution with a shock wave in a liquid. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*, no. 1, pp. 137–144. (in Russian)

18. **Turkin, I.K.** (2023). Research of the dynamic response of a shell of an aircraft with the structural inner mass under thermal and force loading. In: *Dinamicheskiye i tekhnologicheskiye problemy mekhaniki konstruktivnykh i sploshnykh sred: materialy XXIX Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova*. Moscow: OOO TRP, vol. 1, pp. 206–207. (in Russian)

Сведения об авторах

Туркин Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и прочности авиационно-ракетных и космических изделий Московского авиационного института (национального исследовательского университета), kafedra_602@mail.ru.

Рогов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник сектора расчетов прочности и надежности АО «ОНПП “Технология”» им. А.Г. Ромашина», rogov.dmitry.76@yandex.ru.

Грачев Виктор Александрович, инженер 2 категории сектора расчетов прочности и надежности АО «ОНПП “Технология”» им. А.Г. Ромашина», viktoral Alexandrovich.g@gmail.com.

Information about the authors

Igor K. Turkin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Design and Strength of Aviation, Rocket and Space Products, Moscow Aviation Institute (National Research University), kafedra_602@mail.ru.

Dmitry A. Rogov, Candidate of Technical Sciences, The Head of the Sector of Strength and Reliability Calculations of JSC ORPE “Technologiya” named after A.G. Romashin, rogov.dmitry.76@yandex.ru.

Viktor A. Grachev, engineer of the 2nd category Sectors of Strength and Reliability Calculations of JSC ORPE “Technologiya” named after A.G. Romashin, viktoralexandrovich.g@gmail.com.

| | | | |
|-------------------------------|------------|--------------------------|------------|
| Поступила в редакцию | 02.12.2024 | Received | 02.12.2024 |
| Одобрена после рецензирования | 11.02.2025 | Approved after reviewing | 11.02.2025 |
| Принята в печать | 25.03.2025 | Accepted for publication | 25.03.2025 |