

Взаимодействие ударных волн с объектами сложной геометрии

П. З. Луговой^а, М. И. Михайлова^а, В. Ф. Мейш^а, С. П. Малашенков^б,
И. И. Аникьев^а, Е. А. Сущенко^а

^а Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, Киев, Украина

^б Институт химии поверхности НАН Украины, Киев, Украина

Проведено расчетно-экспериментальное исследование динамического поведения натурального обтекателя, представляющего собой стеклопластиковую тонкостенную трехслойную оболочечную структуру. С помощью экспериментального моделирования определен конкретный вид дифракционной нагрузки, который использовался в последующих теоретических расчетах. В рамках модели оболочек типа Тимошенко выполнено численное моделирование динамического поведения обтекателя при действии на него плоской ударной волны.

Ключевые слова: натурная стеклопластиковая оболочка, ударная волна, численное моделирование, эксперимент.

Введение. Для обеспечения надежности работы различных радиоустройств широко используются тонкостенные радиопрозрачные защитные обтекатели, представляющие собой оболочечные конструкции, динамическому поведению которых уделяется большое внимание [1]. На этапах проектирования и изготовления опытных образцов важным является вопрос изучения прочности и устойчивости конструкций обтекателей под действием динамических нагрузок.

Ввиду большой сложности и высокой стоимости изделий современной техники проведение натурных экспериментов весьма проблематично и осуществляется, как правило, на заключительной стадии проектирования. Особенно ответственный характер приобретают экспериментальные исследования по определению предельных нагрузок, при которых происходит разрушение либо качественное изменение испытываемых объектов. Это свидетельствует об актуальности разработки методики проведения модельных опытов, многократно реализуемых в лабораторных условиях с целью всестороннего исследования явления.

В настоящей статье выполнено комплексное расчетно-экспериментальное исследование динамического поведения натурального обтекателя для радиолокационных систем, изготовленного из трехслойного стеклопластика, при падении на него плоской ударной волны.

1. Экспериментальное моделирование действия ударной волны. Необходимым этапом проектирования современных конструкций является математическое моделирование на ЭВМ их поведения в штатных и аварийных режимах работы. Данная операция позволяет более целенаправленно осуществлять физическое моделирование и ставить натурные эксперименты. Импульсные нагрузки являются определяющими при расчете поведения конструкций, от их оценки в значительной мере зависит точность окончательного решения задачи. Применение сложного математического аппарата

для описания динамического поведения конструкции не дает желаемого результата, если внешние силы определены недостаточно точно. В целом, проблема определения нестационарных нагрузок от действия взрывных источников далека от полного решения, поэтому исследование хотя бы отдельных ее задач представляет определенную ценность.

Известно, что нагрузка, воспринимаемая поверхностью конструкции при падении на нее волны, складывается из трех составляющих: давления в падающей волне; давления в волне, отраженной от объекта как от твердого тела; и давления, излучаемого самой конструкцией в процессе перемещения и деформирования под действием ударной волны. В [2, 3] показано, что процесс формирования нагрузки на поверхности деформируемого объекта при падении волн с давлением $\Delta P < 0,5 \cdot 10^5$ Па можно определить, используя геометрически подобную модель и измеряя при этом дифракционное давление P_d (сумма давлений в падающей волне и в волне, отраженной от объекта как от твердого тела).

Дифракционный процесс исследовался на жесткой модели типа цилиндр–полусфера, повторяющей геометрию натурного обтекателя. Модель изготавливали на токарном станке из дюралюминия (радиус цилиндрической и сферической частей составлял 35 мм). Модель крепились на торце длинного стального цилиндра, ось которого проходила параллельно направлению распространения волны в канале ударной трубы прямоугольного сечения 210×140 мм [4]. Установка давала возможность получать ударные волны с крутым фронтом, давлением до $1 \cdot 10^5$ Па и длительностью $8 \cdot 10^{-3}$ с.

Регистрация нагрузок на поверхности модели проводилась миниатюрными пьезодатчиками [5], прикрепленными лицевой стороной к поверхности модели. Точки, в которых проводилась регистрация нагрузок, указаны на рис. 1. Здесь точка 1 имеет угловую координату $\varphi = 0$; точка 2 – $\varphi = \pi/6$; точка 3 – $\varphi = \pi/4$; точка 4 – $\varphi = \pi/3$; точка 5 – $\varphi = \pi/2$. Точка 6 на цилиндрической поверхности отстоит от основания модели на расстоянии равном 5 мм. Регистрация осциллограмм дифракционного давления проводилась на осциллографах С1-33, С1-74. В каждом опыте измерялась скорость фронта падающей ударной волны с погрешностью, не превышающей 1%, что обуславливало ошибку в расчетах давлений P_d не более $\pm 2\%$ [6]. Общая погрешность измерения дифракционного давления не превысила $\pm 7\%$.

Измерения проводились при падении на модель ударных волн со скачком давления во фронте ΔP от $0,1 \cdot 10^5$ до $0,4 \cdot 10^5$ Па. Численные значения фронтальных величин безразмерного дифракционного давления $P_d/\Delta P$ в точках 1–6 модели для трех случаев падения волн с амплитудами $0,1 \cdot 10^5$; $0,2 \cdot 10^5$ и $0,4 \cdot 10^5$ Па приведены в табл. 1.

На рис. 1 схематически показаны эпюры нагрузок, действующих на поверхности модели в различные моменты времени для случая $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$ Па.

Около каждой эпюры указано безразмерное время $t = \tau c/R$, где τ – время от начала соприкосновения фронта волны с моделью в секундах; c –

скорость звука в воздухе; R – радиус сферической и цилиндрической частей модели. По нормали к поверхности модели отложено отношение $P_d / \Delta P$, причем единичное значение указанного отношения принято равным радиусу модели. Общая длительность неустановившейся фазы формирования нагрузки примерно равна времени, за которое волна проходила линейный размер модели ($t \approx 2$), после чего наступало одинаковое по величине всестороннее сжатие, равное давлению ΔP за фронтом ступенчатой ударной волны.

Т а б л и ц а 1

Пространственное распределение давления по поверхности обтекателя

| № точки | $P_d / \Delta P$ при ΔP | | |
|---------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| | $0,1 \cdot 10^5$ Па | $0,2 \cdot 10^5$ Па | $0,4 \cdot 10^5$ Па |
| 1 | 2,1 | 2,2 | 2,3 |
| 2 | 1,8 | 1,9 | 2,1 |
| 3 | 1,7 | 1,8 | 2,0 |
| 4 | 1,5 | 1,5 | 1,7 |
| 5 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| 6 | 1,0 | 1,1 | 1,2 |

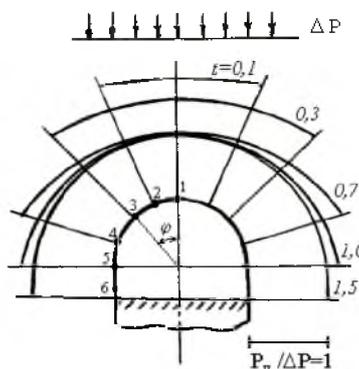


Рис. 1. Схема эпюр нагрузок на поверхности экспериментальной модели в различные моменты времени для случая $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$ Па.

2. Уравнения колебаний обтекателя. Исходя из полученных экспериментальных данных по определению параметров дифракционной картины на жесткой модели цилиндр–полусфера, проведено математическое моделирование динамики составного обтекателя. Обтекатель рассматривался как трехслойная составная конструкция, представляющая собой полусферический купол, жестко соединенный с цилиндрическим отсеком того же радиуса. Элементы указанной структуры подвергались действию распределенной ударной нагрузки. Предполагается, что напряженно-деформированное состояние исходной упругой оболочечной структуры может быть определено в рамках геометрически нелинейного варианта теории тонких оболочек типа Тимошенко в квадратичном приближении [7]:

$$\begin{cases} \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 T_{11}) - \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} T_{22} \right] + k_1 \bar{T}_{13} = I_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}; \\ \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 \bar{T}_{13}) \right] - k_1 T_{11} - k_2 T_{22} + P_3(\alpha_1, t) = I_1 \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}; \\ \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 M_{11}) - \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} M_{22} \right] - T_{13} = I_2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} T_{11} &= B_{11}(\varepsilon_{11} + \nu_{21}\varepsilon_{22}); & T_{22} &= B_{22}(\varepsilon_{22} + \nu_{12}\varepsilon_{11}); \\ \bar{T}_{13} &= T_{13} + T_{11}\Theta_1; & T_{13} &= B_{13}k^2\varepsilon_{13}; \\ M_{11} &= D_{11}(\kappa_{11} + \nu_{21}\kappa_{22}); & M_{22} &= D_{22}(\kappa_{22} + \nu_{12}\kappa_{11}); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{2} \Theta_1^2 + k_1 u_3; \quad \varepsilon_{22} = \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} u_1 + k_2 u_3;$$

$$\varepsilon_{13} = \varphi_1 + \Theta_1; \quad \Theta_1 = \frac{1}{A_2} \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} - k_1 u_1;$$

$$\kappa_{11} = \frac{1}{A_1} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha_1}; \quad \kappa_{22} = \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_1} \varphi_1; \quad (3)$$

$$B_{11} = \frac{E_1 h}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad B_{22} = \frac{E_2 h}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}; \quad B_{13} = G_{13} h;$$

$$D_{11} = \frac{E_1 h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})}; \quad D_{22} = \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})}; \quad I_1 = \rho h; \quad I_2 = \frac{\rho h^3}{12}.$$

В приведенных уравнениях величины α_1, t – пространственная и временная координаты; A_1, A_2, k_1, k_2 – параметры срединной поверхности оболочки, которые отвечают за геометрическую форму частей обтекателя; u_1, u_3, φ_1 – компоненты обобщенного вектора перемещений срединной поверхности оболочки; $T_{11}, T_{22}, T_{13}, M_{11}, M_{22}$ – интегральные характеристики напряжений, возникающих в оболочке; I_1, I_2 – приведенные инерционные жесткостные параметры; h – толщина оболочки; ρ – плотность материала оболочки; $E_1, E_2, G_{13}, \nu_{12}, \nu_{21}$ – физико-механические параметры материала оболочки; $P_3(\alpha_1, t)$ – нагрузка на поверхности обтекателя.

Уравнения движения составной оболочечной конструкции (1)–(3) дополняются соответствующими граничными условиями. Начальные условия при $t = 0$ нулевые.

Отметим, что здесь используется конструктивно-ортотропная модель трехслойной оболочечной структуры с ячеистым наполнителем, для которой интегральные значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона определяются согласно экспериментальным данным.

3. Численный алгоритм решения задачи. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния обтекателя при нестационарном нагружении проводилось численными методами. В расчетах использовался интегро-интерполяционный метод построения конечно-разностных схем по пространственной координате α_1 и явная схема интегрирования по временной координате t . Для численного решения в области изменения непрерывных аргументов $s = \alpha_1 A_1$ и t вводится равномерная сетка с шагами Δs и Δt . Аппроксимации исходных функций строятся на множестве точек с целыми индексами по пространственной координате для компонент обобщенного вектора перемещений u_1, u_3, φ_1 и полуцелыми индексами для величин деформаций (3) и величин усилий и моментов (2). Такой подход обеспечивает сохранение дивергентной формы разностного представления разрешающих уравнений, а следовательно, и выполнение закона сохранения полной механической энергии на разностном уравне. Разностная аппроксимация исходных уравнений (1)–(3) имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{A_{2i}} \left[\frac{(A_2 T_{11}^n)_{i+1/2} - (A_2 T_{11}^n)_{i-1/2}}{\Delta s} \right] - \Psi_i \frac{T_{22i+1/2}^n + T_{22i-1/2}^n}{2} + \\ & + k_{1i} \frac{\bar{T}_{13i+1/2}^n + \bar{T}_{13i-1/2}^n}{2} = I_1 (u_{1i}^n)_{\bar{t}i}; \\ & \frac{1}{A_{2i}} \left[\frac{(A_2 \bar{T}_{13}^n)_{i+1/2} - (A_2 \bar{T}_{13}^n)_{i-1/2}}{\Delta s} \right] - k_{1i} \frac{T_{11i+1/2}^n + T_{11i-1/2}^n}{2} - \\ & - k_{2i} \frac{T_{22i+1/2}^n + T_{22i-1/2}^n}{2} + P_3 (s_i, t^n) = I_1 (u_{3i}^n)_{\bar{t}i}; \\ & \frac{1}{A_{2i}} \left[\frac{(A_2 M_{11}^n)_{i+1/2} - (A_2 M_{11}^n)_{i-1/2}}{\Delta s} \right] - \Psi_i \frac{M_{22i+1/2}^n + M_{22i-1/2}^n}{2} - \\ & - \frac{T_{13i+1/2}^n + T_{13i-1/2}^n}{2} = I_2 (\varphi_{1i}^n)_{\bar{t}i}; \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} T_{11i\pm 1/2}^n &= B_{11} (\varepsilon_{11i\pm 1/2}^n + \nu_{21} \varepsilon_{22i\pm 1/2}^n); \\ T_{22i\pm 1/2}^n &= B_{22} (\varepsilon_{22i\pm 1/2}^n + \nu_{12} \varepsilon_{11i\pm 1/2}^n); \quad \dots; \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{11i-1/2}^n &= \frac{u_{1i}^n - u_{1i-1}^n}{\Delta s} + \frac{1}{2}(\Theta_{1i-1/2}^n) + \frac{k_{1i-1}u_{1i-1}^n + k_{1i}u_{1i}^n}{2}; \\
 \varepsilon_{11i+1/2}^n &= \frac{u_{1i+1}^n - u_{1i}^n}{\Delta s} + \frac{1}{2}(\Theta_{1i+1/2}^n) + \frac{k_{1i}u_{1i}^n + k_{1i+1}u_{1i+1}^n}{2}; \\
 \Theta_{1i+1/2}^n &= \frac{u_{3i+1}^n - u_{3i}^n}{\Delta s} - \frac{k_{1i+1}u_{1i+1}^n + k_{1i}u_{1i}^n}{2}; \\
 \Theta_{1i-1/2}^n &= \frac{u_{3i}^n - u_{3i-1}^n}{\Delta s} - \frac{k_{1i}u_{1i}^n + k_{1i-1}u_{1i-1}^n}{2}; \dots
 \end{aligned} \tag{6}$$

Обозначение разностных величин и производных введено согласно [8].

Для исследования устойчивости линеаризованных разностных уравнений на основе (4)–(6) примем необходимое условие устойчивости разностных уравнений [8], согласно которому

$$\Delta t \leq 2/\omega,$$

где ω – максимальная частота собственных колебаний дискретной системы оболочки.

При численных расчетах оболочечных структур, состоящих из оболочечных элементов разной геометрии (сфера–цилиндр, конус–цилиндр, и т.д.), по линиям контактов указанных элементов возникают сингулярности. Для устранения особенностей в точках изменения геометрии оболочечных элементов используется специальный алгоритм. Предположим, что s_j – точка жесткого соединения оболочечных элементов разной геометрии по координате s . Выделим переходный элемент соединения оболочечных элементов разной геометрии $s_{j-1/2} \leq s \leq s_{j+1/2}$ и запишем для него следующие условия:

$$u_1^+ = u_1^-; \quad u_3^+ = u_3^-; \quad \varphi_1^+ = \varphi_1^-; \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 T_{11}^+ - T_{11}^- &= I_1 \Delta s \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}; \\
 \bar{T}_{13}^+ - \bar{T}_{13}^- - k_{1j}T_{11j} - k_{2j}T_{22j} + P_3 \Delta s \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} &= I_1 \Delta s \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}; \\
 M_{11}^+ - M_{11}^- - T_{13j} &= I_2 \Delta s \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где

$$T_{11j} = B_{11} \Delta s (k_{1j} + \nu_{21} k_{2j}) u_3;$$

$$T_{22j} = B_{22} \Delta s (k_{2j} + \nu_{12} k_{1j}) u_3;$$

$$T_{13j} = B_{13} \Delta s \varphi_1;$$

величины T_{11}^{\pm} , \bar{T}_{13}^{\pm} , M_{11}^{\pm} – компоненты обобщенного вектора усилий, которые действуют на переходный элемент $s_{j-1/2} \leq s \leq s_{j+1/2}$ слева (верхний индекс – минус) и справа (верхний индекс – плюс).

Для подтверждения достоверности и точности предлагаемой численной методики проведено сопоставление численных результатов согласно уравнениям (1)–(8) с известными экспериментальными данными [9] по динамическому деформированию замкнутых стальных составных оболочек полушара–цилиндра при внутреннем взрыве заряда сферической формы. При определении профиля давления, действующего на внутреннюю поверхность конструкции, использовалась эмпирическая зависимость для величины давления, возникающего от взрыва сферического заряда взрывчатого вещества (ВВ):

$$P_3(x, t) = \begin{cases} \frac{\kappa m Q}{x^3}, & \text{при } t \leq \frac{\kappa x}{\sqrt{Q}}; \\ 0, & \text{при } t \geq \frac{\kappa x}{\sqrt{Q}}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\kappa = 8(3\gamma - 1)/[25(\gamma^2 - 1)].$$

В формуле (9) m – масса сферического заряда ВВ, Q – теплотворная способность ВВ, x – расстояние от центра заряда до внутренней поверхности конструкции, γ – показатель адиабаты в уравнении состояния ВВ.

Параметры рассматриваемой конструкции полагались следующие: $L = 4R_0$; $L_c = 2R_0$; $R_0 = 21,3 \cdot 10^{-2}$ м; $h/R_0 = 0,047$; $m = 1,327$ кг; где R_0 – внутренний радиус цилиндрической и сферической частей конструкции; L – общая длина конструкции; L_c – длина цилиндрической части конструкции. При расчетах в уравнениях (1)–(8) задавали $A_1 = 1$; $A_2 = R$; $k_1 = 0$; $k_2 = 1/R$ для цилиндрической части и $A_1 = R$; $A_2 = R \sin \alpha_1$; $k_1 = k_2 = 1/R$ для сферической части. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений [9] приведен в табл. 2. Здесь t_1 – время от начала радиального смещения стенок рассматриваемой конструкции до достижения ими максимальной скорости в сечении $s = 2R_0$; ε_{22} – соответствующее этому моменту времени значение окружной деформации; t_2 – время достижения прогибом u_3 максимального значения; T – период радиальных колебаний. Регистрация деформаций ε_{22} во времени в центральном поперечном сечении составной оболочки проводилась методами фоторегистрации и тензометрирования.

Значительная разница в величине t_2 объясняется тем, что в численных расчетах максимум прогиба достигается во втором полупериоде колебаний, а в эксперименте – в третьем полупериоде.

Т а б л и ц а 2

Сравнение расчетных данных обтекателя с экспериментальными

| Характеристики | Расчет по (1)–(8) | Эксперимент [9] |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| t_1 , мкс | 42 | 40 |
| ε_{22} | 0,018 | 0,015 |
| t_2 , мкс | 190 | 300 |
| T , мкс | 245 | 240 |

Использование явной конечно-разностной схемы интегрирования по координате t позволяет детально анализировать характеристики напряженно-деформированного состояния обтекателя в любой момент времени на заданном интервале времени.

4. **Исследование конкретного образца.** Рассматриваемый обтекатель представляет собой трехслойную структуру, которая состоит из двух обшивок толщиной $1,3 \cdot 10^{-3}$ м и $0,85 \cdot 10^{-3}$ м и расположенным между ними ячеистым наполнителем при общей толщине $11 \cdot 10^{-3}$ м. Расчет напряженно-деформированного состояния обтекателя при действии плоской ударной волны на основании уравнений (1)–(8) и экспериментальных данных (см. п. 1), осуществлялся при следующих геометрических и физико-механических параметрах: $R = 1,425$ м; $L = 0,89$ м; $\rho = 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³; $E = 6 \cdot 10^9$ Па; $\nu = 0,3$; где L – длина цилиндрической части обтекателя. Интегральные физико-механические характеристики обтекателя принимали в соответствии с паспортными данными изделия. При расчетах сферической части обтекателя полагалось $A_1 = R$, $A_2 = R \sin \alpha_1$, $k_1 = k_2 = 1/R$, где α_1 – угол между осью вращения и нормалью в текущей точке; для цилиндрической части обтекателя – $A_1 = 1$, $A_2 = R$, $k_1 = 0$, $k_2 = 1/R$. Нагрузку $P_3(\alpha_1, t)$ задавали согласно экспериментальным данным при $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$ Па (см. п. 1). Расчет проводился на временном интервале $0 \leq t \leq 10T$, где $T = R/c$, $c = 340$ м/с – скорость звука в воздухе. При численных расчетах анализировались величины прогиба u_3 , поперечной деформации ε_{22} и поперечного напряжения σ_{22} по длине обтекателя на интервале $0 \leq t \leq 10T$. Как показали результаты вычислений, максимальные величины ε_{22} и σ_{22} наблюдаются в области полюса полусферической оболочки и цилиндрической оболочки в области $x \approx L/2$. Зависимости величины напряжения σ_{22} в области цилиндрической оболочки $x \approx L/2$ и области полюса сферической части конструкции для временного интервала $0 \leq t \leq 10T$ приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Следует отметить, что максимальная величина деформаций ε_{22} имеет порядок 10^{-3} , а максимальные значения напряжений σ_{22} не превышают величин порядка 10^6 Па. На рис. 4 приведены зависимости величины прогиба u_3 по центральному сечению обтекателя в моменты времени $t = 3T$ (кривая 1)

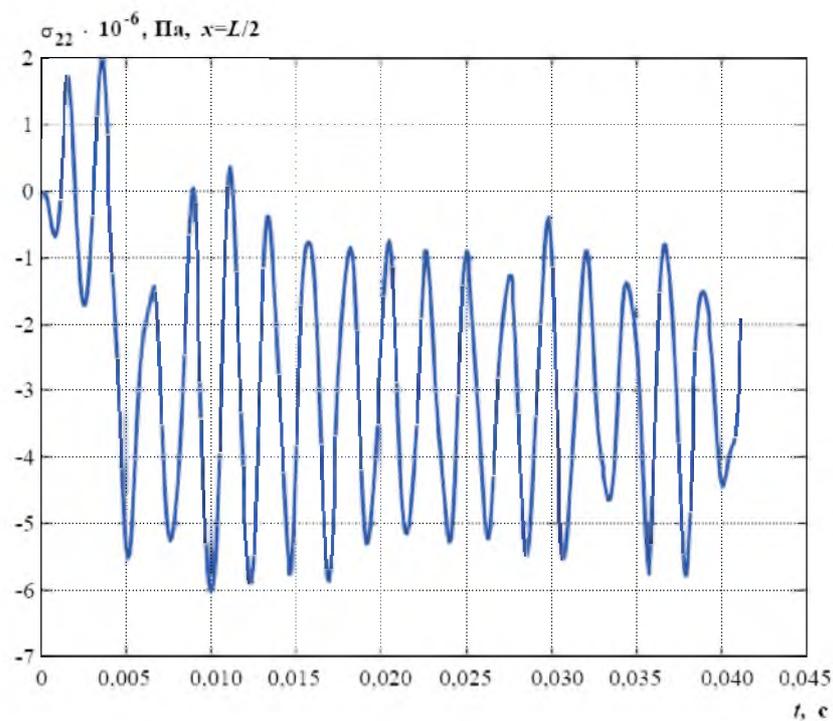


Рис. 2. Зависимость величины напряжений σ_{22} от времени t в области цилиндрической части обтекателя $x \approx L/2$.

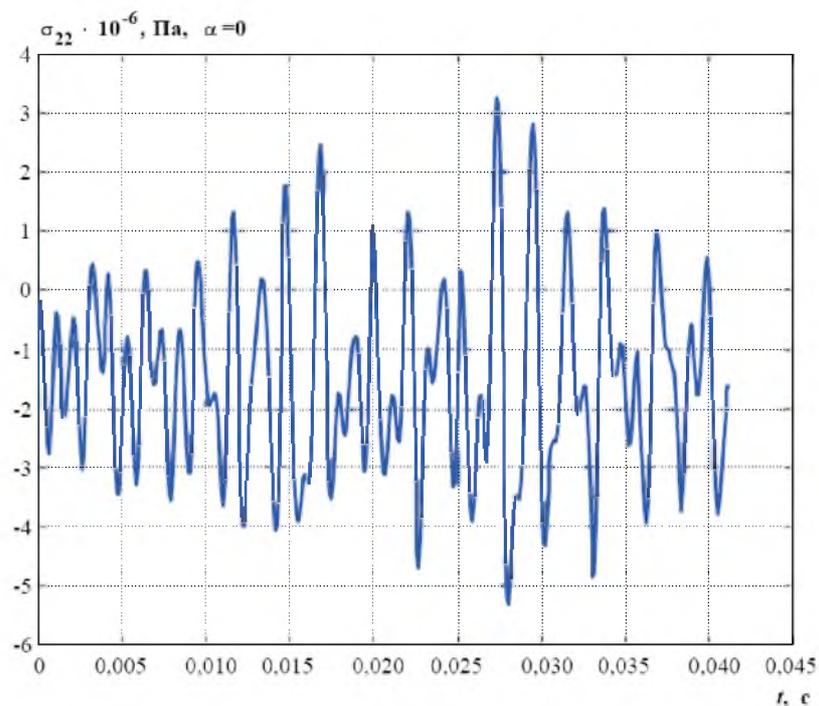


Рис. 3. Зависимость величины напряжений σ_{22} от времени t в области полюса сферической части обтекателя.

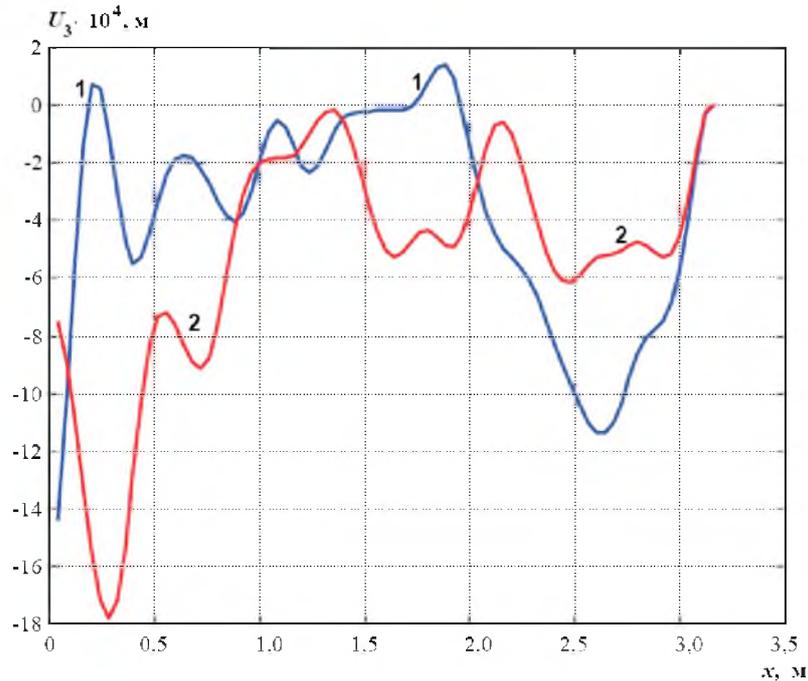


Рис. 4. Зависимости величины прогиба u_3 по центральному сечению обтекателя для времен $t = 3T$ (кривая 1) и $t = 6T$ (кривая 2).

и $t = 6T$ (кривая 2), которые соответствуют достижению максимальных значений u_3 . Качественная картина распределения максимальных величин u_3 аналогична величинам ε_{22} и σ_{22} , т.е., максимумы наблюдаются в области полюса и в области $x \approx L/2$ цилиндрической части обтекателя. Максимальный прогиб u_3 не превышает значения порядка $0,2h$. При сопоставлении результатов по приведенным уравнениям в линейной и геометрически нелинейной постановке выявлено существенное отличие (до 20–25%) в ряде точек по максимальным величинам (нелинейной теории соответствуют большие величины).

Заключение. В работе экспериментально определен и использован в последующих теоретических расчетах конкретный вид дифракционной нагрузки при набегании на обтекатель ударной волны $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$ Па. Математическое моделирование динамики обтекателя под действием ударной волны показало, что максимальные перемещения в наиболее опасных точках обтекателя (полюс полусферы и середина цилиндрической оболочки) не превышает $0,2h$, а деформации $\varepsilon \leq 10^{-3}$. Анализ проведенных исследований позволяет заключить, что обтекатель сохраняет свою работоспособность после воздействия на него в направлении оси ударной волны амплитудой до $\Delta P = 0,2 \cdot 10^5$ Па. Представленная методика может быть использована при проектировании объектов сложной геометрии, устойчивых к действию ударных волн.

Резюме

Проведено розрахунково-експериментальне дослідження динамічної поведінки натурального обтічника, що представляє собою склопластикову тонкостінну тришарову оболонкову структуру. За допомогою експериментального моделювання визначено конкретний тип дифракційного навантаження, що використовувався при подальших теоретичних розрахунках. У рамках моделі оболонок типу Тимошенка виконано числове моделювання динамічної поведінки обтічника при дії на нього плоскої ударної хвилі.

1. *Lugovoi P. Z.* Dynamics of thin-walled structures under nonstationary loads // *Int. Appl. Mech.* – 2001. – **37**, No. 5. – P. 602 – 627.
2. *Mikhailova M. I.* Problems on nonstationary interaction of structural elements with shock waves // *Ibid.* – No. 10. – P. 1237 – 1254.
3. *Взрывные явления. Оценка и последствия.* Кн. 1 / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
4. *Экспериментальные исследования тонкостенных конструкций* / Под ред. А. Н. Гузя, В. А. Заруцкого. – Киев: Наук. думка, 1984. – 240 с.
5. *А. с. 1059456 (СССР).* Датчик импульсных давлений / И. И. Аникьев, М. И. Михайлова, А. С. Спировский, Е. А. Сущенко // *Бюлл. изобр.* – 1983. – № 45. – С. 181.
6. *Механика композитных материалов и элементов конструкций: В 3-х т. Т. 3. Прикладные исследования* / Под общ. ред. А. Н. Гузя. – Киев: Наук. думка, 1983. – 264 с.
7. *Луговой П. З., Мейш В. Ф.* Численное моделирование динамического поведения подкрепленных оболочек вращения при нестационарном воздействии // *Прикл. механика.* – 1992. – **28**, № 11. – С. 38 – 44.
8. *Рихтмайер Р. Д., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 418 с.
9. *Цыпкин В. И., Иванов А. Г., Минеев В. И., Шитов А. Н.* Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении // *Атомная энергия.* – 1976. – **41**, № 5. – С. 303 – 308.

Поступила 17. 10. 2002