

УДК 539.3:622.235

В.Г. Кравець, д.т.н., проф.

Т.В. Косенко, інж.

Національний технічний університет України "КПІ"

### ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПОДОВЖЕНИХ ШНУРОВИХ ЗАРЯДІВ З ПОВІТРЯНОЮ ПОРОЖНИНОЮ

*Розроблена методика чисельного моделювання динамічної поведінки циліндричних оболонок подовжених шнурових зарядів з повітряною порожниною, що дозволяє визначити необхідні параметри оболонок і передбачити результати вибухової діяльності.*

Для передачі вибухового імпульсу на потрібні відстані з надійним захистом оточуючого середовища і живих організмів часто використовують подовжені заряди з повітряною порожниною, що утворюється між захисною циліндричною оболонкою і розташованим вздовж її осі шнуровим зарядом типу детонуючого шнура (ДШ).

Основним завданням дослідження є визначення геометричних і фізико-механічних параметрів оболонки, що похибка повинна надійно забезпечувати захист від шкідливого впливу вибуху. Розглянемо випадок, коли на осі оболонки вибухає шнуровий заряд. Повітряна оболонка утворюється між зовнішньою поверхнею шнурового заряду і внутрішньою поверхнею циліндричної оболонки розміром  $r_{10}$  (рис. 1), котрий визначає максимальний радіус повітряної порожнини. Оскільки в цьому випадку конструкція циліндричної оболонки і вибухове навантаження від шнурового заряду, що діє на неї, є осесиметричними, осесиметричним є і поле розповсюдження вибухових хвиль.

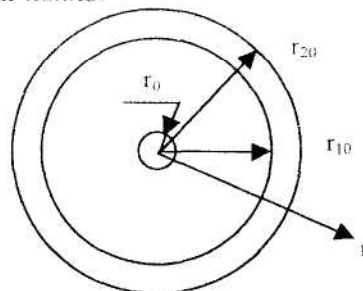


Рис. 1. Схема заряду з оболонкою

Для дослідження заряду такої конструкції будемо застосовувати теорію циліндричних оболонок в осесиметричній постановці. Відповідні рівняння можна представити у вигляді [1]:

$$\begin{aligned} \rho_1 h \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - \frac{\partial N_1}{\partial x} &= 0, \\ \rho_1 h \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} - \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{N_2}{R} &= P_n, \\ \rho_1 h^3 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - Q + \frac{\partial M}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $h = r_{20} - r_{10}$ ,  $R = (r_{20} + r_{10})/2$ ;

$N_1$ ,  $N_2$  – внутрішні зусилля в оболонці в поздовжньому і радіальному напрямках;

$x$  – координата вздовж утворюючої оболонки;

$Q$  – перерізаюча сила в перерізі  $x = \text{const}$ ;

$M$  – згинальний момент у тому ж перерізі;

$\psi$  – кут повороту перерізу;

$u_1$ ,  $u_n$  – компоненти вектора переміщень вздовж осі  $x$  і по нормалі до неї;

$p_n$  – навантаження від вибуху шнурового заряду;

$t$  – час.

Внутрішні зусилля  $N_1, N_2$ , що входять у рівняння (1), згинальний момент  $M$  і перерізаюча сила  $Q$  визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{Eh}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x} - \nu \frac{u_n}{R} \right), \\ N_2 &= \frac{Eh}{1-\nu^2} \left( -\frac{U_n}{R} + \nu \frac{\partial u_1}{\partial x} \right), \\ M &= -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \\ Q &= Gh \left( \frac{\partial W}{\partial x} - \psi \right), \end{aligned} \tag{2}$$

де  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  – модуль зсуву.

Розглянемо випадок, коли край оболонки, біля якого почалась детонація, вільний:  $N_1 = M = Q = 0$ , а в точці детонації шнурового заряду жорстко защемлений:  $\psi = u_1 = u_n = 0$ . Початкові умови нульові.

Чисельний метод розв'язку рівнянь руху циліндричної оболонки (1) ґрунтується на застосуванні інтегро-інтерполяційного методу побудови кінцево-різничних схем другого порядку точності за часовою і просторовою координатами [2]:

$$\begin{aligned} \left[ (N_1^i)_{k-1}^j \right]_{x_i} &= \rho_1 h \left[ (u_1^i)_{k-1}^j \right]_{x_i}, \\ \left[ (Q^i)_{k-1}^j \right]_{x_i} + \frac{1}{R} (N_2^i)_k^j + \rho_{nk}^j &= \rho_1 h \left[ (u_n^i)_k^j \right]_{x_i}, \\ - \left[ (M^i)_{k-1}^j \right]_{x_i} + (Q^i)_k^j &= \rho_1 \frac{h^3}{12} \left[ (\psi^i)_k^j \right]_{x_i}. \end{aligned} \tag{3}$$

(в  $k$ -тому вузлі просторової координати  $x_i$  і на  $j$ -тому часовому шарі).

Такий підхід дозволяє зберегти дивергентну форму різничного представлення рівнянь (3) і, отже, – виконання закону збереження повної механічної енергії системи на різничному рівні. Різничні вирази для зусиль-моментів і відповідних величин деформацій, а також вирахування різничних похідних за просторовою і часовою координатами виконані відповідно до [2].

Враховуючи, що застосовується явна кінцево-різнична схема, при розрахунках різничні кроки вибирались виходячи з умови  $\Delta t = K \Delta s / c_{II}$ , де  $c_{II} = E / [\rho (1 - \nu^2)]$ ,  $K$  – число Куранта,  $\Delta t$  – кроки за часом,  $\Delta s$  – крок за відстанню. При розрахунках вважалось:  $K = 0,3-0,5$ , виходячи з практичної збіжності результатів.

Проведемо чисельне моделювання механічної поведінки циліндричних зарядів, оболонки яких виконані з пружно-пластичних матеріалів: міді, алюмінію і поліетилену з тими ж геометричними розмірами, що розглядались вище. В цьому випадку:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0,0105 \text{ м} - 0,01 \text{ м} = 0,0005 \text{ м}; & R_1 &= (0,0105 + 0,01) / 2 = 0,01025 \text{ м}; \\ h_2 &= 0,011 \text{ м} - 0,01 \text{ м} = 0,001 \text{ м}; & R_2 &= (0,011 + 0,01) / 2 = 0,0105 \text{ м}; \\ h_3 &= 0,0115 \text{ м} - 0,01 \text{ м} = 0,0015 \text{ м}; & R_3 &= (0,0115 + 0,01) / 2 = 0,01075 \text{ м}; \\ h_4 &= 0,012 \text{ м} - 0,01 \text{ м} = 0,002 \text{ м}; & R_4 &= (0,012 + 0,01) / 2 = 0,011 \text{ м}. \end{aligned}$$

Як шнуровий заряд, розташований вздовж осі оболонки, виберемо детонуючий шнур марки ДШ-А з теновою серцевиною при витраті 12 г/п.м. Навантаження на оболонку  $p_n$ , яку виконує миттєвий вибух такого шнурового заряду в повітряній порожнині, визначимо виходячи з емпіричних залежностей [3]:

$$p_n = 10,2 \frac{c}{r^2} + 2 \frac{c^{3/8}}{r^{3/4}}. \tag{4}$$

Тиск, згідно з експериментальними даними [3], з часом зменшується за експонентою, а загальна тривалість його дії не перевищує величини  $\tau = r_0 / c_0$  [4], де  $r_0$  – радіус заряду ( $r_0 = 0,004 \text{ м}$ ),  $c_0 = 340 \text{ м/с}$  – швидкість звуку в повітрі, звідки  $\delta \leq 1,176 \times 10^{-5} \text{ с}$ .

Результати чисельного моделювання показують, що за допомогою подовжених зарядів досліджуваної конструкції вибуховий імпульс можна передати на потрібну відстань з надійним захистом оточуючого середовища від вибухових хвиль.

Проведемо оцінку міцності мідної, алюмінієвої і поліетиленової оболонок згідно з [5] за критичними деформаціями. Для циліндричних оболонок під дією внутрішнього тиску  $p$ , величина якого визначається згідно з [3], умова, що матеріал оболонки працює в пружній зоні, може бути записано у вигляді [5]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{k_d p R_i}{h_i E_i} < 0,3 \%, \tag{5}$$

де  $k_d$  – коефіцієнт динамічності, який дорівнює 2.

Результати розрахунку мідної, алюмінієвої і поліетиленової оболонок різних геометричних розмірів наведені в табл. 1, де дано залежності максимальних окружних деформацій  $\varepsilon_{\max}$  від характерних параметрів вказаних оболонок  $h_i / R_i$ .

Таблиця 1

Результати розрахунків оболонки різних геометричних розмірів

i	$h_i / R_i$	Мідь	Алюміній	Поліетилен
		$\varepsilon_{\max}, \%$	$\varepsilon_{\max}, \%$	$\varepsilon_{\max}, \%$
1	0,049	0,404	0,722	3,230
2	0,095	0,207	0,396	1,655
3	0,140	0,141	0,270	1,129
4	0,182	0,108	0,207	0,867

Згідно з числовими даними, отриманими з (1) і наведеними в таблиці, впливає, що для мідної оболонки:  $h_i / R_i \geq 0,095$ , для алюмінієвої:  $h_i / R_i \geq 0,140$ , для поліетиленової:  $h_i / R_i \geq 0,2$ .

Дослідимо більш детально коливально-хвильові процеси в оболонках з такими параметрами за допомогою числового моделювання на основі рівняння (1). В результаті числової реалізації поставленої задачі отримана залежність максимального нормального прогину мідної захисної оболонки  $U_n$  для  $h_i / R_i = 0,095$  від координати вздовж здетонованого заряду (рис. 2). На рис. 3 наведений графік коливань вільного торця оболонки, з якого почалась детонація заряду.

Аналогічні розрахунки були проведені для алюмінієвої ( $h_i / R_i = 0,140$ ) і поліетиленової ( $h_i / R_i = 0,2$ ) оболонок, результати яких наведені на рис. 4–7 відповідно.

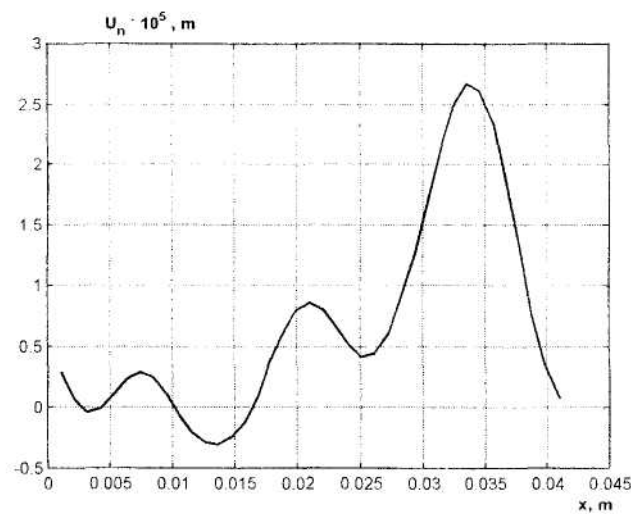


Рис. 2. Зміна величини  $U_n$  вздовж мідної оболонки

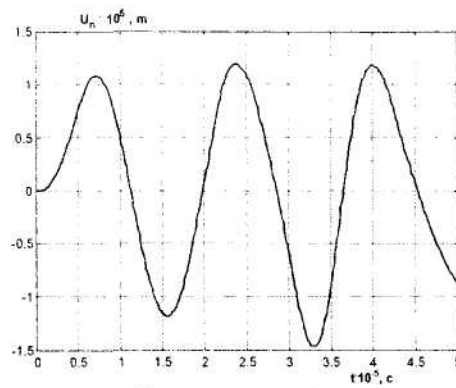


Рис. 3. Залежність величини  $U_n$  від часу  $t$  на вільному торці мідної оболонки  $x = 0$

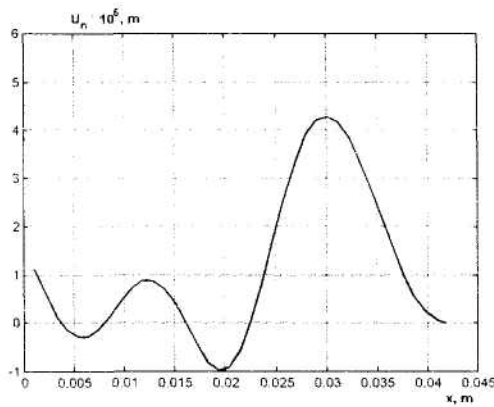


Рис. 4. Зміна величини  $U_n$  вздовж алюмінієвої оболонки

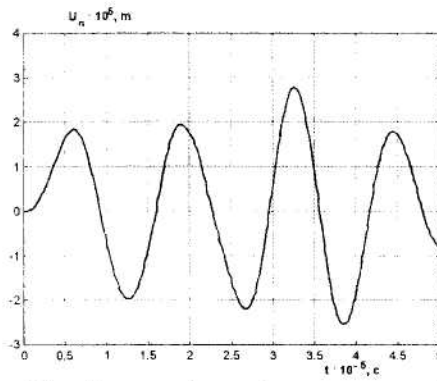


Рис. 5. Залежність величини  $U_n$  від часу  $t$  на вільному торці алюмінієвої оболонки  $x = 0$

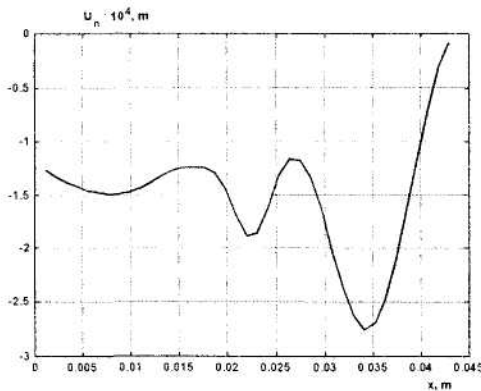


Рис. 6. Зміна величини  $U_n$  вздовж поліетиленової оболонки

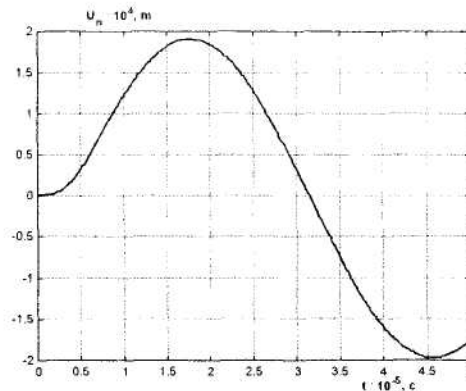


Рис. 7. Залежність величини  $U_n$  від часу  $t$  на вільному торці поліетиленової оболонки  $x = 0$

З графіків випливає, що максимальні прогини і мінімальна частота коливань властиві поліетиленовій оболонці, що відповідає її фізико-механічним властивостям.

Розглянуті вище конструкції зарядів хоч і складні у виготовленні, проте часто використовуються в техніці, в пристроях і конструкціях, де виникає необхідність передати вибуховий імпульс через середовище з живими організмами або через відсіки з чутливими приладами. Розроблена в даній статті методика числового моделювання дії таких зарядів дозволяє визначити необхідні параметри захисних оболонок і передбачити результати вибухової післядії.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Луговой П.З., Мукоид В.П., Мейш В.Ф. Динамика оболочечных конструкций при взрывных нагрузках. К.: Наукова думка, 1991. – 280 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
3. Цикулин М.А. Воздушная ударная волна при взрыве цилиндрического заряда большой длины // ПМТФ. – 1960. – №3. – С. 188–193.
4. Баум Ф.А., Огиенко Л.П. и др. Физика взрыва. – М.: Недра, 1975. – 704 с.
5. Сопротивление материалов / Под. ред. акад. АНКСР Г.С. Писаренко. – К.: Выща шк. 1986. – 775 с.

КРАВЕЦЬ Віктор Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геобудівництва та гірничих технологій Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:  
– вибухові роботи.

КОСЕНКО Тетяна Володимирівна – інженер кафедри геобудівництва та гірничих технологій Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:  
– вибухові роботи.

Подано 23.01.03