

ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В ҐРУНТОВИХ МАСИВАХ ПІД ЧАС ВИБУХІВ НОВИХ СУМІШЕВИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

І. А. Лучко, докт. техн. наук (НТУУ “КПІ”), Н. С. Ремез, докт. техн. наук (ІГМ НАН України), А. І. Лучко, інж. (ПІ “Укрспецтунельпроект”)

Приведены количественные результаты численного решения задачи о распространении ударных волн в грунтовом массиве во время взрывов цилиндрических зарядов новых смесевых взрывчатых веществ.

Сьогодні широко виконуються дослідження щодо розроблення нових промислових сумішевих вибухових речовин (ВР) і методів їх застосування на відкритих гірничих роботах і при будівництві об'єктів різного призначення в скельних гірських породах. Метою таких досліджень є досягнення високих техніко-економічних показників і поліпшення технологічної та екологічної безпеки порівняно з застосуванням заводських ВР [1]. У зв'язку з цим дослідження хвильових процесів у м'яких гірських породах при дії вибуху цих нових ВР є актуальними з наукової і практичної точок зору.

Виконаємо порівняння результатів дії вибуху зарядів традиційних та нових сумішевих ВР [1] на основі чисельного моделювання. Розглянемо циліндричний заряд ВР нескінченної довжини і радіуса r_0 в ґрунтовому просторі удалині від вільної поверхні. Нехай заряд детонує миттєво. При цьому по всьому об'єму заряду встановлюються однаковий тиск p_n і щільність продуктів детонації (ПД) ρ_n , яка дорівнює початковій щільності ВР. Рух ПД і ґрунту описуються законами збереження імпульсу, маси і внутрішньої енергії, які для випадку осової симетрії мають вигляд [2]

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}, \quad U = \frac{\partial r}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho U)}{\partial r} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + p \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \bar{V} (S_r \dot{\epsilon}_r + S_\theta \dot{\epsilon}_\theta + S_z \dot{\epsilon}_z) = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_i = S_i - p, \quad (i = r, \theta, z), \quad (4)$$

де ρ – поточна щільність; U – швидкість; t – час; p – середній гідростатичний тиск; r, θ, z – циліндричні координати; σ_i, S_i – компоненти тензора і девіатора тензора напружень; $\bar{V} = V/V_0$, V, V_0 – відносний, поточний і початковий питомі об'єми. Для продуктів детонації $S_i = 0$. Для компонентів тензора швидкостей деформацій виконуються співвідношення

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\partial U}{\partial r}; \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{U}{r}, \quad \dot{\varepsilon}_z = 0. \quad (5)$$

Розширення продуктів детонації описується двочленною ізентропою [3]

$$p = A\rho^{n_0} + B\rho^{\gamma+1}. \quad (6)$$

Константи A, B, n_0, γ у рівнянні (6) однозначно визначаються за відомими детонаційними характеристиками ВР.

Ґрунт моделюється твердим пористим багатокомпонентним середовищем зі змінним коефіцієнтом об'ємної в'язкості $\eta(\varepsilon)$ [4]. Рівняння стиску і навантаження середовища має однаковий вигляд для навантаження і розвантаження:

$$\dot{\varepsilon} = \varphi(p, \varepsilon) \dot{p} - \frac{\alpha_1 \lambda(p, \varepsilon)}{\eta(p, \varepsilon)} \psi(p, \varepsilon). \quad (7)$$

Але функції, що входять у рівняння (7), різні для цих двох режимів деформування. Для навантаження

$$\varphi(p, \varepsilon) = \alpha_1 \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} - \sum_{i=2}^3 \alpha_i B_i [A_i(p - p_0) + 1]^{-k_i - 1}$$

;

$$\lambda(p, \varepsilon) = 1 - \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} \frac{df_S}{d\varepsilon_1}, \quad \psi(p, \varepsilon) = p - p_0 - f_S(\varepsilon_1);$$

$$f_S(\varepsilon_1) = A_S^{-1} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} - 1], \quad f_D(\varepsilon_1) = f_S(\varepsilon_1) + k\varepsilon_1, \quad k < 0; \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\alpha_1} \left(\varepsilon - \sum_{i=2}^3 \alpha_i \varepsilon_i \right) = \frac{1}{\alpha_1} \left\{ \varepsilon + 1 - \sum_{i=2}^3 \alpha_i [A_i(p - p_0) + 1] \right\}^{-k_i} - 1;$$

$$A_i = \frac{\gamma_i}{\rho_{i0} c_{i0}^2}, \quad B_i = \frac{1}{\rho_{i0} c_{i0}^2}, \quad k_i = \frac{1}{\gamma_i}, \quad i = 2, 3, \quad A_S = \frac{\gamma_S}{\rho_0 c_S^2},$$

де $\varepsilon, \varepsilon_i$ – об'ємні деформації середовища і компонентів ($i = 1$ – поровий простір; $i = 2$ – рідкий компонент, $i = 3$ – твердий компонент); α_i – вміст компонентів в одиниці об'єму ґрунту; ρ_{i0}, c_{i0} – щільності компонентів і швидкості звуку в них при атмосферному тиску P_0 ; γ_i – показники степеня в рівняннях Тета для компонентів; ρ_0 – початкова щільність ґрунту; c_S, γ_S – швидкість звуку і показник степеня при статичному навантаженні.

Для розвантаження маємо:

$$\varphi(P, \varepsilon) = \alpha_1 \left[\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} + \frac{df_{SR}}{d\varepsilon_1} \right]^{-1} - \sum_{i=2}^3 \alpha_i B_i [A_i (p - p_0) + 1]^{-k_i - 1};$$

$$\psi(p, \varepsilon) = p - p_0 - f_{SR}(\varepsilon_1);$$

$$f_S(\varepsilon_1) = A_S^{-1} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} - 1], \quad f_D(\varepsilon_1) = f_S(\varepsilon_1) + k\varepsilon_1, \quad k < 0; \quad (9)$$

$$f_{SR}(\varepsilon_1) = A_{SR}^{-1} \left\{ \left\{ \varepsilon_1 + 1 + [A_{SR}(p_m - p_0) + 1]^{-1/\gamma_{SR}} - [A_S(p_m - p_0) + 1]^{-1/\gamma_S} \right\}^{-\gamma_{SR}} - 1 \right\};$$

$$p_m - p_0 = A_S^{-1} [(\varepsilon_{1m} + 1)^{-\gamma_S} - 1], \quad k_i = \frac{1}{\gamma_i}, \quad i = 2, 3,$$

$$A_S = \frac{\gamma_S}{\rho_0 c_S^2}, \quad A_{SR} = \frac{\gamma_{SR}}{\rho_0 c_{SR}^2}.$$

де c_{SR} – швидкість звуку при розвантаженні середовища; γ_{SR} – показник степеня в рівнянні об'ємного стиску при розвантаженні середовища; P_m – тиск при досягненні об'ємною деформацією порового простору максимального значення ε_{1m} .

Згідно з [4] коефіцієнт в'язкості має вигляд

$$\eta(p, \varepsilon) = \eta_D \left\{ \frac{p - p_0 - \frac{\rho_0 c_S^2}{\gamma_S} [\gamma_S \varepsilon_1 - 1 + (\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S}]}{\varepsilon_1 (k - \rho_0 c_S^2)} \right\} \quad (10)$$

Умовою пластичності ґрунту є умова Мізеса–Боткіна [5]:

$$S_r = - \left(y_0 + \frac{k_t p}{1 + \frac{k_t p}{\tau - y_0}} \right), \quad S_\theta = -\frac{1}{2} S_r; \quad (11)$$

$$S_z = \frac{2(1 + k_t)}{1 + 2k_t} p,$$

де y_0 – зчеплення ґрунту; k_t – коефіцієнт внутрішнього тертя; τ – граничне значення міцності на зсув.

Початковими умовами даної задачі є:

$$U = 0, \quad p = p_n, \quad \rho = \rho_n \quad \text{при } 0 \leq r < r_0;$$

$$U = 0, \quad p = \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = 0, \quad \rho = \rho_0 \quad \text{при } r_0 \leq r. \quad (12)$$

Граничними умовами є:

1) умова неперервності швидкості і напружень σ_r на контактній границі продукти детонації–грунт;

2) умова «непротікання» – швидкість на осі заряду дорівнює нулю.

Для апроксимації системи квазілінійних диференціальних рівнянь (1)–(12) використовувався метод скінченних різниць із застосуванням скінченно-різницевої схеми типу «хрест» другого порядку точності по просторовій і часовій координатах із застосуванням штучної в'язкості як додатку до тиску з метою наскрізного розрахунку як на гладких течіях, так і на розривних (ударні хвилі, контактні розриви). Умовою стійкості схеми є умова типу Куранта [2].

Розрахунки виконували для лесоподібного суглинку, фізико-механічні характеристики якого такі: $\rho_{20} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{30} = 2650 \text{ кг/м}^3$; $c_{20} = 1500 \text{ м/с}$, $c_{30} = 4500 \text{ м/с}$; $\gamma_2 = 7$; $\gamma_3 = 4$; $\rho_0 c_S^2 = 3 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $\rho_0 c_D^2 = 3,67 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $\rho_0 c_{SR}^2 = 3 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $m = 3$; $k = -1,2 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $\gamma_S = 4$; $\gamma_D = 6$; $\gamma_{SR} = 8$; $\eta_D = 2000 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\alpha_1 = 0,1$; $\alpha_2 = 0,3$; $\alpha_3 = 0,6$; $y_0 = 0,9 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Детонаційні характеристики ВР наведено в таблиці, де поряд із заводськими традиційними ВР розглядаються сумішеві ВР. Полімікс ГР4-Т10 являє собою механічну суміш аміачної селітри (80% по масі), дизельного пального (0,8%), гранулолу (10%) і спеціального компонента (ГНК4) (9,2%). До складу поліміксу ГР1/8 входять: аміачна селітра (89,5% по масі), дизельне пальне (2,5%) і спеціальний компонент ГНК1 (8%) [1].

Детонаційні характеристики вибухових речовин

Вибухові речовини	Теплота вибуху, кДж/кг	ρ , кг/м ³	Швидкість детонації, м/с	A , Па·(кг·м ³) ^{-γ_0}	n_0	B , Па·(кг·м ³) ^{-γ_0-1}	γ_0+1	Тиск, Гпа
Ігданіт	3809,9	850	2500	$1,1 \cdot 10^{-5}$	4,41	$1,502 \cdot 10^5$	1,261	0,834
Грамоніт 79/21	4312,4	950	3300	2,7769	2,78	$1,452 \cdot 10^5$	1,248	1,46
Полімікс ГР4-Т10	3864,4	872	3150	5,67	2,73	$1,279 \cdot 10^5$	1,253	1,234
Полімікс ГР1/8	3944,0	875	3600	56,682	2,47	$1,015 \cdot 10^5$	1,258	1,587

У результаті чисельного розв'язання задачі були отримані графічні функціональні залежності основних параметрів руху середовищ від часу і відстані від осі вибуху.

На рис. 1 зображені залежності середнього гідростатичного тиску, на рис. 2 – залежності об'ємної деформації від часу в суглинку на відносній відстані $\bar{r} = 13,6$ ($\bar{r} = r/r_0$) під час вибухів зарядів різних ВР. Із аналізу зображених залежностей випливає, що на заданій відносній відстані найбільші тиск і об'ємна деформація досягаються під час вибуху заряду поліміксу ГР-1/8 і грамоніту 79/21, а найменші – під час вибуху заряду поліміксу ГР4-Т10 і ігданіту, що відривідає розподілу тисків в продуктах детонації.

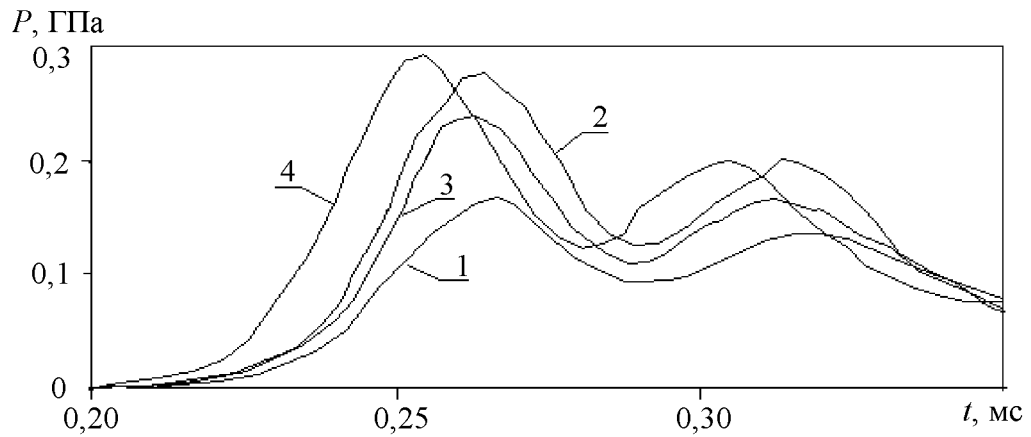


Рис. 1. Залежність тиску від часу на відносній відстані $\bar{r}=13,6$ в суглинку під час вибухів зарядів різних ВР: 1 – ігданіт, 2 – грамоніт 79/21, 3 – полімікс GP4-T10, 4 – полімікс GP 1/8

Відмітимо, що час досягнення максимального тиску найбільший під час вибуху ігданіту і поліміксу GP-T10, а найменший – під час вибуху грамоніту 79/21 і поліміксу GP1/8, що узгоджується з швидкостями детонації цих ВР.

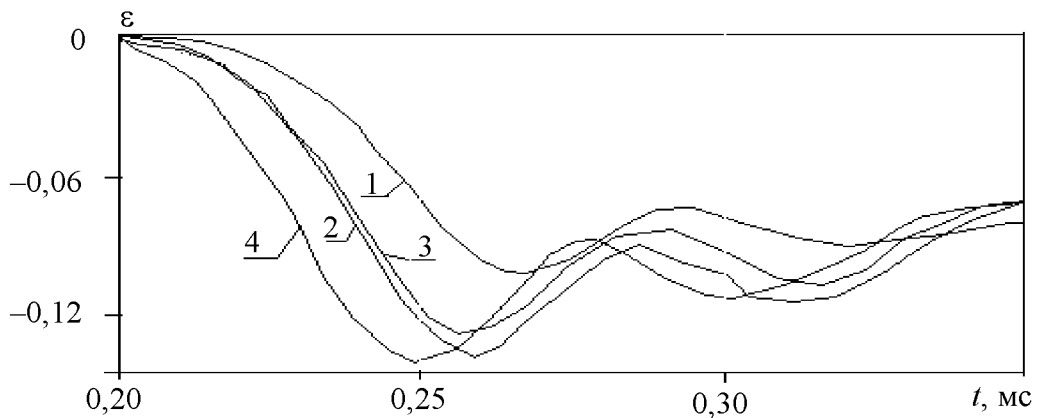


Рис. 2. Залежність об'ємної деформації від часу на відносній відстані $\bar{r}=13,6$ в суглинку під час вибухів зарядів різних ВР

На рис. 3 зображені залежності середнього гідростатичного тиску, а на рис. 4, – залежності об'ємної деформації, від часу, в суглинку, на відносній відстані $\bar{r}=34,2$ під час вибухів зарядів різних ВР. Нумерація кривих на рис. 2, 3 і 4, як і на рис. 1.

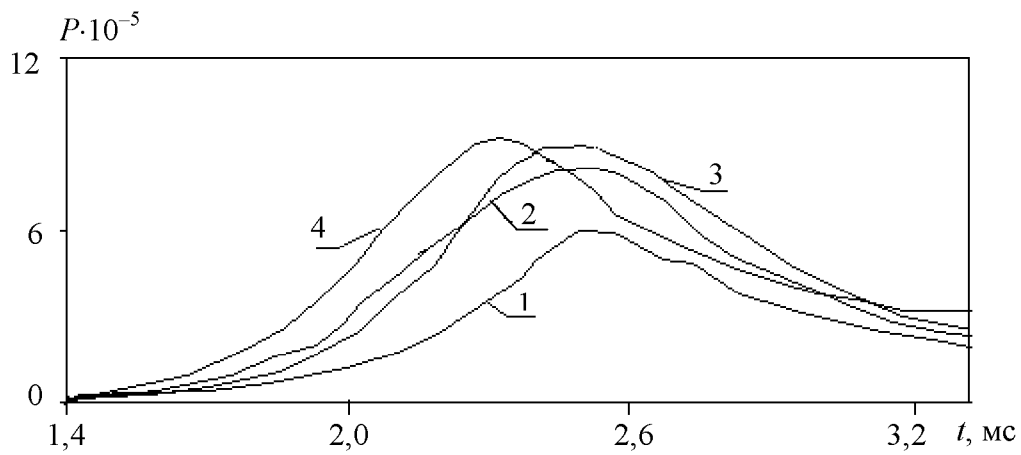


Рис. 3. Залежність середнього гідростатичного тиску від часу на відносній відстані $\bar{r} = 34,2$ в суглинку під час вибухів зарядів різних ВР

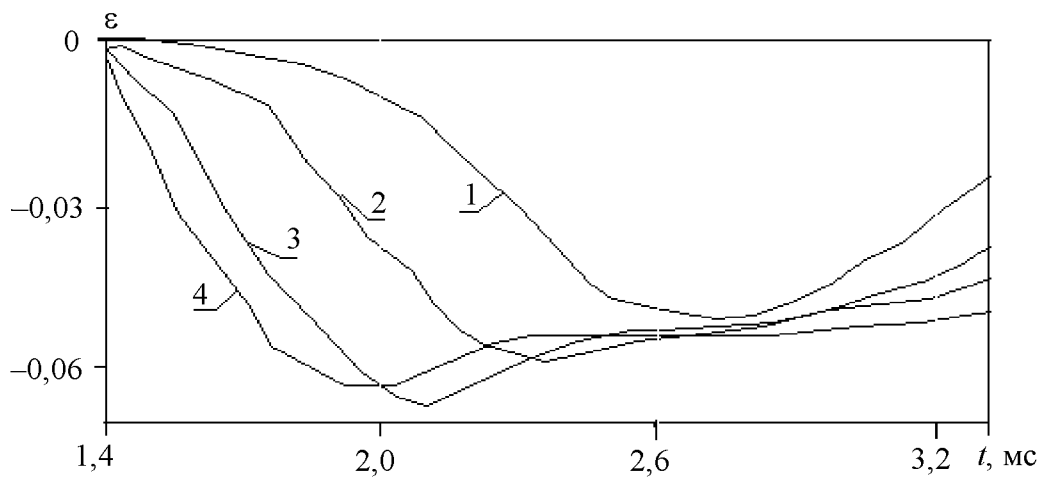


Рис. 4. Залежність об'ємної деформації від часу на відносній відстані $\bar{r} = 34,2$ в суглинку під час вибухів зарядів різних ВР

З аналізу кривих випливає, що з віддаленням від осередка вибуху характер розподілу максимумів тиску і об'ємної деформації змінюється: найбільші значення досягаються під час вибухів сумішевих ВР, а найменші – під час вибухів грамоніту 79/21 та ігданіту.

Таким чином, на всіх відносних відстанях найбільший тиск і об'ємна деформація досягаються при вибуху заряду поліміксу ГР1/8. Це узгоджується з тим, що полімікс ГР1/8 має найбільші детонаційні характеристики в порівнянні з іншими ВР. Крім того, показник степеня n_0 в нього найменший, тому і згасання хвилі з відстанню відбувається повільніше. У ближній зоні вибуху величина максимального тиску та об'ємної деформації відповідає величині детонаційних характеристик ВР: найбільші в поліміксу ГР-1/8 і грамоніту 79/21, найменші в поліміксу ГР-Т10 та ігданіту. Але оскільки показник політропи у грамоніту 79/21 більший, ніж у сумішевих ВР, хвилі під час вибуху такої ВР згасають швидше. Тому з віддаленням від осередку вибуху

максимальні тиск і об'ємна деформація під час вибухів сумішевих ВР більші, ніж при вибухах традиційних ВР.

З проведених досліджень можна зробити висновок про ефективність застосування нових промислових сумішевих ВР для ущільнення ґрунтових фундаментів порівняно з традиційними ВР.

Результати цієї роботи можуть бути використані для розрахунку параметрів підривних робіт при ущільненні різних ґрунтів дією вибухів подовжених зарядів.

1. *Прокопенко В. С., Лотоус В. В.* Разрушение твердых горных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах. – К.: Випол, 2003. – 82 с.

2. *Механический эффект взрыва в грунтах / И. А. Лучко, В. А. Плаксий, Н. С. Ремез и др.* – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.

3. *Каширский А. В., Орленко Л. П., Охитин В. Н.* Влияние уравнения состояния на разлет продуктов детонации // Прикл. мех. и техн. физика. – 1973. – 2. – С. 71–74.

4. *Ремез Н. С.* Особливості деформування твердого багатоконпонентного в'язкопластичного середовища зі змінним коефіцієнтом в'язкості при динамічних навантаженнях // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2000. – Вип. 3. – С. 34–39.

5. *Григорян С. С.* К решению задачи о подземном взрыве в мягких грунтах // Прикл. математика и механика. – 1964. – 28. – Вып. 2. – С. 1070–1075.