

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЇ ВИБУХУ НА ВИКИД ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАРЯДІВ СКІНЧЕННИХ РОЗМІРІВ У ШАРУВАТИХ ГРУНТАХ

*І. А. Лучко, докт. техн. наук (НТУУ „КПІ”), А. І. Лучко, інж.
(Ш „Укрспецтунельпроект”)*

В результате математической обработки экспериментальных данных с использованием теории подобия и размерностей получены корреляционные зависимости размеров выемок выброса от основных параметров взрыва горизонтальных цилиндрических зарядов конечных размеров в двухслойных грунтах.

В праці [1] з використанням теорії подібності та розмірностей розроблено методику визначення параметрів вибухів на викид сферичних і скінченної довжини горизонтальних циліндричних зарядів вибухових речовин (ВР) в однорідних і шаруватих грунтах. На базі цієї методики були отримані кореляційні залежності розмірів воронки викиду від основних параметрів вибуху сферичного заряду ВР у слабкозв'язаному однорідному [2] і двошаровому [3] грунтах, а також визначені аналогічні залежності для розмірів виїмок викиду під час вибуху горизонтальних циліндричних зарядів скінченних розмірів в однорідних слабкозв'язаних грунтах [4].

Розглянемо питання про застосування розробленої методики [1] до розрахунку дії вибуху горизонтальних циліндричних зарядів скінченних розмірів у двошарових грунтах. Залежність розмірів виїмок викиду від безрозмірних комплексів під час вибуху горизонтальних циліндричних зарядів скінченних розмірів у двошарових грунтах має вигляд [1]:

$$\frac{R}{w}, \frac{H}{w}, \frac{L}{w}, \frac{S}{w^2}, \frac{V}{w^3} = f_j(\pi_{1ц}) \cdot f_j(\pi_{2ц}) \cdot f_j(\pi_{3ц}) \cdot f_j(\pi_{4ц}), \quad (1)$$

де R, H, L, S і V – відповідно радіус поверху, видима глибина, довжина, площа поперечного вертикального перерізу і об'єм виїмки викиду; w – глибина закладання заряду; f_j – поправочні коефіцієнти на умови підривання. Вони являють собою невідомі безрозмірні функції своїх безрозмірних аргументів $\pi_{iц}(i = 1, \dots, 4)$ і визначаються поетапно експериментальним шляхом.

Безрозмірні комплекси $\pi_{iц}$ для горизонтального циліндричного заряду скінченних розмірів

$$\pi_{1ц} = E_l w^{-\frac{8}{3}} \alpha_1^{\frac{1}{3}} (\rho_0 g)^{-\frac{2}{3}} \rho_0^{-\frac{1}{3}};$$

$$\pi_{2ц} = \frac{l}{w};$$

$$\pi_{3ц} = E_l w^{\frac{8}{3}} \alpha_1^{\frac{1}{3}} (\rho_1 g)^{\frac{2}{3}} \tau^{-\frac{1}{3}}; \quad (2)$$

$$\pi_{4ц} = \frac{h}{w},$$

де E_l – енергія вибуху циліндричного заряду одиничної довжини; l – довжина заряду; ρ_0 , ρ_1 і α_1 , α_1' – щільність і вільна пористість відповідно слабкозв'язаного і міцнозв'язаного ґрунтів; g – прискорення вільного падіння; P_0 – атмосферний тиск; τ – міцність ґрунту на зсув; h – товщина верхнього шару ґрунту.

Експериментальному визначенню функцій $f_j(\pi_{1ц})$ і $f_j(\pi_{2ц})$ присвячена праця [4]. Наша задача полягає у визначенні конкретних виразів для функцій $f_j(\pi_{3ц})$ і $f_j(\pi_{4ц})$.

Для встановлення цих функцій були виготовлені моделі ґрунтового масиву типу шар–півпростір. В одній групі моделей верхній шар був складений із слабкозв'язаного ґрунту, а в іншій – із ґрунту з суттєвою міцністю на зсув.

У першій серії дослідів (1-й варіант моделі) ґрунтовий півпростір був складений з кварцового середньозернистого піску з щільністю $\rho_0 = 1610 \dots 1670$ кг/м³, вологістю 3,0...6,8%, вільною пористістю $\alpha_1 = 0,38 \dots 0,42$. Ґрунтом верхнього шару була глина з щільністю $\rho_0 = 2020 \dots 2140$ кг/м³, вологістю 7,4...13,5%, вільною пористістю $\alpha_1' = 0,28 \dots 0,34$, граничною напругою на зсув $\tau = 16,8 \dots 66,6$ кН/м², $h = w = 0,04 \dots 0,18$ м. Підривали заряди з гексогену діаметром $d = 0,014$ м, довжиною $l = 0,05 \dots 0,2$ м, щільністю $\rho_{ВР} = 1115 \dots 1630$ кг/м³.

У другій серії дослідів (2-й варіант моделі) ґрунтом слабкозв'язаного верхнього шару був повітряно-сухий кварцовий середньозернистий пісок зі щільністю $\rho_0 = 1467 \dots 1650$ кг/м³ і вільною пористістю $\alpha_1 = 0,41 \dots 0,46$. Ґрунтом півпростору при цьому був супісок природного залягання з щільністю $\rho_1 = 1962 \dots 2089$ кг/м³, вологістю 7,5...12,7%, вільною пористістю $\alpha_1' = 0,33 \dots 0,36$ і граничною напругою на зсув $\tau = 9,3 \dots 55,9$ кН/м². Підривали заряди з гексогену діаметром $d = 0,014$ м, довжиною $l = 0,05 \dots 0,365$ м, щільністю $\rho_{ВР} = 1052 \dots 1342$ кг/м³. Товщина піщаного шару h і глибина закладання заряду w змінювалися в межах $h = w = 0,03 \dots 0,2$ м.

Спочатку в двох перших серіях дослідів заряди розміщували так, щоб вісь симетрії заряду проходила по межі розділу шар–півпростір. Цим забезпечувалася постійність параметра $\pi_{4ц} = 1$ при

$$w = h = \text{var.}$$

Крім результатів експериментів, проведених у зазначених умовах, для встановлення вигляду функцій $f_j(\pi_{3ц})$ були використані результати експериментальних маломасштабних вибухів [5]. Тут моделлю шаруватого середовища був шар сухого дрібнозернистого піску вологістю не більше одного

відсотка і товщиною $h = 0,06$ м разом із залізобетонною плитою, на якій він розміщувався. Зарядами ВР були відрізки детонувального шнура довжиною один метр. Глибина закладання зарядів була постійною при $w = h = 0,06$ м.

З аналізу результатів описаних вище дослідів були визначені:

$$f_j(\pi_{3ц}) = \frac{i_\phi}{f_j(\pi_{1ц}) \cdot f_j(\pi_{2ц})}, \quad (3)$$

де i_ϕ – один з безрозмірних розмірів виїмки, отриманий в результаті вибуху при $w = h$.

Для встановлення вигляду функцій $f_j(\pi_{4ц})$ були проведені маломасштабні вибухи в шаруватих моделях з властивостями, описаними вище при визначенні $f_j(\pi_{3ц})$. Однак заряд ВР при цьому розміщували вище ($w < h$) або нижче ($w > h$) межі розділу шар–півпростір, тобто $w \neq h$ і $\pi_{4ц} \neq 1$. Підривали заряди гексогену діаметром $d=0,014$ м, довжиною $l=0,15...0,20$ м, щільністю $\rho_{ВР}=1109...1160$ кг/м³. Товщину шару слабкозв'язаного ґрунту змінювали в межах $h = 0,055...0,145$ м. Глибина закладання заряду $w=0,02...0,293$ м. Товщина шару глини $h=0,06...0,10$ м, а глибина закладання заряду $w = 0,034...0,33$ м.

Були використані також результати експериментальних вибухів [6]. Вибухи горизонтальних циліндричних зарядів тену, амоніту 6ЖВ і тротилу виконували в шаруватих моделях і шаруватих природних масивах: суглинок (київський)–бетон; суглинок (житомирський)–бетон; супісок (рівненський)–галечник; суглинок важкий (кримський)–граніт; глина (кримська)–сталь Ст3; глина (кримська)–бетон. Властивості матеріалу в цих моделях і середовищах наведені в [6]. Довжина зарядів становила 0,6 і 1,0 м, товщина шару $h = 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,4; 0,5; 0,55$ і 0,6 м. Заряд ВР з різною лінійною щільністю розміщували на межі розділу і вище неї.

Значення функцій $f_j(\pi_{4ц})$ визначали за формулою

$$f_j(\pi_{4ц}) = \frac{i_\phi}{f_j(\pi_{1ц}) \cdot f_j(\pi_{2ц}) \cdot f_j(\pi_{3ц})}. \quad (4)$$

У результаті математичної обробки відомих експериментальних результатів і результатів власних дослідів встановлено, що кореляційні залежності $f_j(\pi_{3ц})$ і $f_j(\pi_{4ц})$ мають вигляд, наведений в таблиці. Коефіцієнт кореляції для цих залежностей змінюється в інтервалі 0,7...0,95. Отримані кореляційні залежності в зазначених інтервалах зміни безрозмірних аргументів можна застосовувати для визначення розмірів виїмок і величини зарядів під час вибухів горизонтальних циліндричних зарядів викиду в шаруватих ґрунтах.

Безрозмірні функції, пов'язані з розмірами виїмок викиду в шаруватих ґрунтах

Варіант моделі	Кореляційна залежність	Інтервал зміни безрозмірного аргументу	Варіант моделі	Кореляційна залежність	Інтервал зміни безрозмірного аргументу
Для радіуса виїмки викиду			Для видимої глибини виїмки		
1	$f_R(\pi_{3ц}) = 0,542 \pi_{3ц}^{0,03}$	$1000 \leq \pi_{3ц} \leq 5 \cdot 10^5$	1	$f_H(\pi_{3ц}) = 0,342 \pi_{3ц}^{0,0796}$	$1000 \leq \pi_{3ц} \leq 5 \cdot 10^5$
2	$f_R(\pi_{3ц}) = 0,409 \pi_{3ц}^{0,1345}$	$40 \leq \pi_{3ц} \leq 10000$	2	$f_H(\pi_{3ц}) = 0,0245 \pi_{3ц}^{0,708}$	$40 \leq \pi_{3ц} \leq 291$
2	$f_R(\pi_{3ц}) = 2,6568 \pi_{3ц}^{-0,066}$	$10000 \leq \pi_{3ц} \leq 3,55 \cdot 10^5$	2	$f_H(\pi_{3ц}) = 1,7303 \pi_{3ц}^{-0,0423}$	$291 \leq \pi_{3ц} \leq 5 \cdot 10^5$
1	$f_R(\pi_{4ц}) = 0,2466 \exp(1,4\pi_{4ц})$	$1,0 \leq \pi_{4ц} \leq 1,25$	1	$f_H(\pi_{4ц}) = -0,307 \pi_{3ц}^2 +$	$1,0 \leq \pi_{4ц} \leq 3,3$
1	$f_R(\pi_{4ц}) = 1,4891 \pi_{4ц}^{-0,2611}$	$1,25 \leq \pi_{4ц} \leq 3,3$		$+1,478\pi_{4ц} - 0,171$	
1	$f_R(\pi_{4ц}) = 1,3159 \exp(-0,2654\pi_{4ц})$	$0,19 \leq \pi_{4ц} \leq 1,0$	1	$f_H(\pi_{4ц}) = 2,05 - 1,05\pi_{4ц}$	$0,16 \leq \pi_{4ц} \leq 1,0$
2	$f_R(\pi_{4ц}) = 0,421(\pi_{4ц} - 1)^{0,828} \exp[-1,555(\pi_{4ц} - 1)]$	$1,0 \leq \pi_{4ц} \leq 7,0$	2	$f_H(\pi_{4ц}) = 1,073 - 0,073\pi_{4ц}$	$1,0 \leq \pi_{4ц} \leq 3,7$
2	$f_R(\pi_{4ц}) = 0,828 + 0,166\pi_{4ц}$	$0,315 \leq \pi_{4ц} \leq 1,0$	2	$f_H(\pi_{4ц}) = 0,779 + 0,111\pi_{4ц}$	$3,7 \leq \pi_{4ц} \leq 7,15$
2	$f_R(\pi_{4ц}) = 0,868 + 0,04\pi_{4ц}$	$0,06 \leq \pi_{4ц} \leq 0,315$	2	$f_H(\pi_{4ц}) = \pi_{4ц}^{0,625}$	$0,09 \leq \pi_{4ц} \leq 1,0$
Для площі вертикального поперечного перерізу виїмки викиду					
1	$f_S(\pi_{3ц}) = 0,3177 \pi_{3ц}^{0,059}$	$1000 \leq \pi_{3ц} \leq 5 \cdot 10^5$	1	$f_S(\pi_{4ц}) = 1,7346 - 0,7346\pi_{4ц}$	$0,16 \leq \pi_{4ц} \leq 1,0$
2	$f_S(\pi_{3ц}) = 0,4734 \pi_{3ц}^{0,1406}$	$40 \leq \pi_{3ц} \leq 11685$	2	$f_S(\pi_{4ц}) = 1,551 - 0,551\pi_{4ц}$	$1,0 \leq \pi_{4ц} \leq 1,6$
2	$f_S(\pi_{3ц}) = 7,509 \pi_{3ц}^{-0,1545}$	$11685 \leq \pi_{3ц} \leq 1,6 \cdot 10^4$	2	$f_S(\pi_{4ц}) = 0,5057 + 0,041\pi_{4ц}$	$1,6 \leq \pi_{4ц} \leq 7,15$
1	$f_S(\pi_{4ц}) = 0,7488 + 0,2523\pi_{4ц}$	$1,0 \leq \pi_{4ц} \leq 3,3$	2	$f_S(\pi_{4ц}) = 0,2409 + 0,7591\pi_{4ц}$	$0,06 \leq \pi_{4ц} \leq 1,0$

У подальшому автори планують висвітлити наукові рекомендації з розрахунку параметрів підривних робіт при утворенні виїмок в однорідних і двошарових ґрунтах вибухами сферичних і скінченної довжини горизонтальних циліндричних зарядів.

1. *Лучко І. А.* Методика визначення параметрів вибухів сферичних і скінченної довжини горизонтальних циліндричних зарядів при проходженні відкритих виїмок у шаруватих ґрунтах // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К. – 2000. – Вип. 2. – С. 29–35.

2. *Лучко І. А.* Результати моделювання дії вибуху на викид сферичних зарядів в однорідних слабкозв’язаних ґрунтах // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К. – 2000. – Вип. 3. – С. 14–16.

3. *Лучко І. А., Лучко А. І.* Результати фізичного моделювання дії вибуху на викид сферичних зарядів у шаруватих ґрунтах // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К. – 2001. – Вип. 6. – С. 17–21.

4. *Лучко І. А., Лучко А. І.* Дослідження особливостей дії вибуху на викид горизонтальних циліндричних зарядів скінченних розмірів в однорідних слабкозв’язаних ґрунтах // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К. – 2004. – Вип. 10. – С. 6–13.

5. *Труфанов Н. А.* Особенности взрывов на выброс двухрядных и зигзагообразных горизонтальных зарядов в слоистых грунтах // Взрывное дело. – М.: Недра. – 1986. – № 88/45. – С. 116–119.

6. *Киньколых Н. Ф.* Разработка взрывных методов проходки выработок в геологически неоднородных грунтовых массивах: Дис...канд. техн. наук. – К., Институт гидромеханики НАН Украины, 1990. – 177 с.