

# ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.235

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХІВ СФЕРИЧНИХ І ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАРЯДІВ ДЛЯ ПРОХОДЖЕННЯ КАМУФЛЕТНИХ ПОРОЖНИН

*І.А. Лучко, докт. техн. наук (НТУУ "КПІ", ІЕЕ)*

*На основі аналізу результатів теоретических досліджень динамічного поведіння ґрунтів под действием камуфлетных взрывов сферических и цилиндрических зарядов из различных взрывчатых веществ, выполненных с использованием модели ґрунта в виде твердой пористой многокомпонентной вязкопластичной среды, а также результатов экспериментальных исследований автора и других исследователей получены расчетные формулы для определения радиусов полостей и соответствующих масс зарядов в зависимости от параметров среды и взрывчатых веществ.*

Відомо багато підходів до визначення параметрів вибухів зарядів різних конструкцій з різних вибухових речовин (ВР) з метою отримання порожнин у різноманітних ґрунтах та їх ущільнення. Одні автори додержуються чисто емпіричного підходу, який ґрунтується на спрощеному уявленні про пропорційність розмірів порожнин чи величини деформації ґрунту масі заряду з уведенням додаткових емпіричних коефіцієнтів. Інші використовують для зазначених цілей виключно механіко-математичне моделювання процесу вибуху в ґрунтах. Але очевидно, що використання простих моделей не може привести до доброго узгодження з експериментальними даними. Результати ж теоретичних досліджень, що ґрунтуються на сучасних динамічних моделях ґрунту, на даний час не представлені у вигляді інженерних формул, які б у явному вигляді зв'язували шукані величини з параметрами ґрунтів, зарядів і ВР [1-5].

У цій праці автор наводить результати узагальнення числових розрахунків камуфлетної дії сферичних і циліндричних зарядів різних ВР з використанням моделі ґрунту у вигляді твердого пористого багатокомпонентного в'язкопластичного середовища. Ураховані також міркування інших авторів, зокрема результати числових розрахунків для пружнопластичного середовища [6, 7], згідно з якими кінцеве значення радіуса порожнини  $r_n$  є функцією початкового тиску газів у вибуховій порожнині  $P_n$ , границі текучості середовища в умові пластичності Мізеса  $\tau_n$ , акустичної жорсткості середовища  $\rho C_s^2$  ( $\rho$  – щільність середовища;  $C_s$  – швидкість звуку в середовищі), радіуса заряду  $r_0$ . Для центрально-симетричних вибухів і для вибухів з осью симетріїю загальна функціональна залежність має вигляд

$$r_n = \chi r_0 P_n^\alpha \tau_n^\beta (\rho C_t^2)^\gamma, \quad (1)$$

де  $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – коефіцієнт і показники степеня, величини яких залежать від симетрії вибуху.

Узгодженість залежності (1) з експериментальними даними якісно підтверджено в праці [8], в якій на основі аналізу даних про розміри камуфлетних порожнин у скельних і напівскельних породах отримано функціональну залежність, що пов'язує кінцеві розміри камуфлетних порожнин і параметри початкового стану системи у вигляді:

для сферичного заряду ВР

$$r_n = \chi_1 r_0 (\rho_{ВР} \epsilon)^{1/3} (\rho C_t^2)^{-1/9} \sigma_1^{-2/9}, \quad (2)$$

для циліндричного заряду ВР

$$r_n = \chi_2 r_0 (\rho_{ВР} \epsilon)^{1/2} (\rho C_t^2)^{-1/6} \sigma_1^{-1/3}, \quad (3)$$

де  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  – емпіричні коефіцієнти;  $\rho_{ВР}$  – щільність ВР;  $\epsilon$  – питома теплота вибуху;  $\sigma_1$  – міцність породи.

Враховуючи викладене вище при узагальненні числових результатів камуфлетної дії вибуху, запишемо кінцевий радіус камуфлетної порожнини у вигляді функціональної залежності

$$r_n = f(r_0, \rho_{ВР}, D_0, \rho, C_t, k, \sigma_{зч}, \alpha_1), \quad (4)$$

де  $D_0$  – швидкість детонації ВР;  $k = \tan \varphi$ ,  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя;  $\sigma_{зч}$  – параметр, що виражає природу сил зчеплення;  $\alpha_1$  – вільна пористість ґрунту.

При обробці числових результатів методом найменших квадратів в розрахункових діапазонах зміни визначальних безрозмірних параметрів  $\rho_{ВР} D_0^2 [\rho C_t^2 (k \sigma_{зч})^2]^{-1/3} = (0,041 \dots 1,974) 10^6$  і  $\alpha_1 = 0,05 \dots 0,4$  отримано такі залежності:

для вибухів сферичних зарядів

$$r_n = 0,1343 r_0 (\rho_{ВР} D_0^2)^{0,2156} (\rho C_t^2)^{-0,072} (k \sigma_{зч})^{-0,1437} (4,45 + \alpha_1), \quad (5)$$

для вибухів циліндричних зарядів

$$r_n = 0,2095 r_0 (\rho_{ВР} D_0^2)^{0,1817} (\rho C_t^2)^{-0,0606} (k \sigma_{зч})^{-0,1211} (4,93 + \alpha_1). \quad (6)$$

Отримані вирази (5) і (6) відрізняються від (2) і (3) наявністю множника в кінці, який є функцією вільної пористості ґрунту  $\alpha_1$ .

Зіставлення розрахункових і фактичних значень радіусів камуфлетних порожнин було виконано для різних ґрунтів, середовищ і ВР з використанням результатів експериментальних і промислових вибухів [8–11]. Результати зіставлення наведено в таблиці, з якої випливає, що формула (5) дає розрахункові значення радіусів порожнин  $(r_n/r_0)_p$ , які з доброю точністю збігаються з фактичними їх значеннями  $(r_n/r_0)_f$  в ґрунтах з широким діапазоном зміни їх властивостей. Виняток становлять тільки піски, де розбіжність між розрахунковими і фактичними значеннями радіусів порожнин досягає 300 %.

З аналізу результатів маломасштабних дослідів, які проводилися для вивчення впливу щільності та вологості піску на розміри камуфлетних порожнин [12], випливає, що відношення фактичного радіуса порожнини до розрахункового є змінною величиною, яка залежить від масової вологості піску  $w_g$ .

Радіуси камуфлетних порожнин згідно з розрахунками та результатами експериментальних і промислових вибухів у різних грунтах і середовищах

Грунт (середовище)	$(\rho C_T^2)$ , $10^{-8} \text{ Н/м}^2$	$k\sigma_{\text{м}}$ , $\text{Н/м}^2$	$\alpha_1$	ВР	$\rho_{\text{ВР}} D_0^2$ , $10^{-8} \text{ Н/м}^2$	$(r_n/r_0)_f$	$(r_n/r_0)_p$	Джерело інформації
Пісок	1,665	1700	0,23	ТЕН	7,875	4,15	12,34	[10]
Суглинки	1,44...28,8	1820... 10600	0...0,4	амоніт №6 ЖВ	1,962	7...7,6	5,45...9,5	[9]
Суглинки	1,44...41,16	4600... 28000	0...0,25	амоніт №6 ЖВ	1,962	6,8...8,1	4,62...8,06	[9]
Глина	4,25...318,5	1405... 40400	0...0,2	амоніт №6 ЖВ	1,962	4,3...11,5	3,8...8,73	[9]
Глина	10,56	$1,18 \cdot 10^4$	0,09	амоніт №6 ЖВ	1,962	7,6	5,85	[8]
Суглинки	68,04	$2,8 \cdot 10^4$	0,02	амоніт №6 ЖВ	1,962	4,5	4,77	[8]
Пластлін	8,2	$1,8 \cdot 10^4$	0	ТЕН	7,875	7,5	7,45	[10]
Тіосульфат натрію	3,44	$4,5 \cdot 10^6$	0	ТЕН	7,875	3,0	2,576	[10]
Плексиглас	1,08	$7,5 \cdot 10^7$	0	ТЕН	7,875	1,4	1,869	[10]
Мрамур	6,70	$6,5 \cdot 10^7$	0	ТЕН	10,24	1,15	1,65	[11]

В інтервалі щільностей пісків  $\rho = 1450...1750 \text{ кг/м}^3$ , який найчастіше зустрічається в природі, і при  $w_g = 0,02...0,2$  що залежність (рисунок) з задовільною точністю можна представити у вигляді степеневі функції

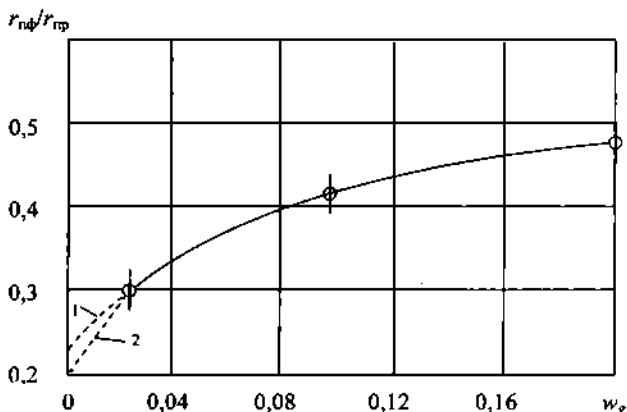
$$r_{np}/r_{np} = 0,6967 w_g^{0,2219}. \quad (7)$$

З урахуванням (7) для вибухів сферичних зарядів у піщаних грунтах

$$r_n = 0,0936 r_0 (\rho_{\text{ВР}} D_0^2)^{0,2156} (\rho C_T^2)^{-0,072} (k\sigma_{\text{м}})^{-0,1437} (4,45 + \alpha_1) w_g^{0,2219} \quad (8)$$

Зіставлення фактичних значень радіусів порожнин [10] з розрахунковими при вибухах циліндричних зарядів у піщаних грунтах засвідчило можливість використання функції (7) і для циліндричних зарядів. У зв'язку з цим вираз для розрахунку кінцевого радіуса порожнини в піску при вибуху циліндричного заряду при відношенні довжини заряду  $l$  до його діаметра  $d$ , більшому за 10, набирав вигляду

$$r_n = 0,146 r_0 (\rho_{\text{ВР}} D_0^2)^{0,1817} (\rho C_T^2)^{-0,0606} (k\rho_{\text{м}})^{-0,1211} (4,93 + \alpha_1) w_g^{0,2219}. \quad (9)$$



Залежність відношення фактичного радіуса камуфлетної порожнини до розрахункового його значення від масової вологості піщаного ґрунту: 1 – фактична залежність; 2 – залежність згідно з формулою (7); вертикальними лініями позначено довірчий інтервал

Із залежностей (5), (6), (8), (9) отримаємо формули для розрахунку маси сферичних і циліндричних зарядів ВР для утворення підземних порожнин камуфлетними вибухами. Враховуючи, що маса сферичного заряду  $C$  виражається через радіус  $r_0$  як  $C = 4/3 \pi r_0^3 \rho_{ВР}$ , а лінійна щільність циліндричного заряду  $C_n = \pi r_0^2 \rho_{ВР}$ , маємо:

$$C = 1,73 \cdot 10^3 \rho_{ВР} r_n^3 (\rho_{ВР} D_0^2)^{-0,6468} (\rho C_s^2)^{0,216} (k\sigma_{31})^{0,4311} (4,45 + \alpha_1)^{-3,0}; \quad (10)$$

$$C_n = 71,6 \rho_{ВР} r_n^2 (\rho_{ВР} D_0^2)^{-0,3634} (\rho C_s^2)^{0,1212} (k\sigma_{31})^{0,2422} (4,93 + \alpha_1)^{-2,0}. \quad (11)$$

Аналогічно для піщаних ґрунтів отримаємо:

$$C = 5,11 \cdot 10^3 \rho_{ВР} r_n^3 (\rho_{ВР} D_0^2)^{-0,6468} (\rho C_s^2)^{0,216} (k\sigma_{31})^{0,4311} (4,45 + \alpha_1)^{-3,0} w_g^{-0,6657}; \quad (12)$$

$$C_n = 147,4 \rho_{ВР} r_n^2 (\rho_{ВР} D_0^2)^{-0,3634} (\rho C_s^2)^{0,1212} (k\sigma_{31})^{0,2422} (4,93 + \alpha_1)^{-2,0} w_g^{-0,4438}. \quad (13)$$

Формули (8)–(13) можна рекомендувати для практичного використання, оскільки вони виведені на основі сучасних уявлень про динаміку поведінки ґрунтів при підірванні з урахуванням характеристик ґрунту і вибухової речовини, прості за структурою, легко піддаються обрахуванню і дають результати, що узгоджуються з експериментальними даними різних авторів.

1. *Вовк А.А., Черный Г.И., Смирнов А.Г.* Основы взрывной проходки подземных выработок. – Киев: Наук. думка, 1966. – 213 с.

2. *Вовк А.А., Черный Г.И., Кравец В.Г.* Действие взрыва в грунтах. – Киев: Наук. думка, 1974. – 207 с.

3. *Вовк А.А.* Основы прикладной геодинамики взрыва. – Киев: Наук. думка, 1976. – 273 с.

4. *Кравец В.Г.* Динамика уплотнения грунтового массива взрывом. – Киев: Наук. думка, 1979. – 132 с.
5. *Лучко И.А., Плахий В.А., Ремез Н.С. и др.* / Механический эффект взрыва в грунтах / Под ред. И.А. Лучко – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
6. *Коротков П.Ф., Просвирина Б.П.* Численное исследование взрыва в упругопластичной среде и некоторые вопросы моделирования // Докл. АН СССР. – 1976. – 228. – № 1. – С. 66–69.
7. *Коротков П.Ф., Просвирина Б.П.* Численное исследование цилиндрического взрыва в упругопластичной среде // Докл. АН СССР. – 1978. – 241. – № 6. – С. 1311–1314.
8. *Левин Б.В.* Об одной простой модели камуфлетного взрыва в скальном грунте // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых, 1985. – № 3. – С. 35–40.
9. *Вовк А.А., Черный Г.И.* Взрывные работы в горных породах. – Киев: Техника, 1973. – 164 с.
10. *Адушкин В.В., Коцый С.А.* О зависимости размеров котловой полости от удлинения цилиндрических зарядов // Взрывное дело. – 1979. – № 81/38. – С. 61–71.
11. *Ханукаев А.Н., Боровиков В.А., Беляцкий В.П.* Определение остаточного давления при камуфлетном взрыве сферического заряда в горной породе // Взрывное дело. – 1972. – № 81/38. – С. 95–98.
12. *Адушкин В.В.* Влияние плотности и влажности песчаного грунта на размеры котловой полости при камуфлетном взрыве // Физика горения и взрыва. – 1979. – № 3. – С. 107–116.

УДК 624.131.23

## ПРО РЕОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛЕСОВОГО ГРУНТУ II ТИПУ ПРОСАДОЧНОСТІ

*А.М. Самедов, докт. техн. наук, Н.Г. Білоус, інж. (НТУУ “КПІ”),  
Р.А. Самедов, асп. (Інститут гідромеханіки НАН України)*

*Рассмотрены явления просадки, связанные с физико-химическими процессами, вызывающими развитие деформаций во времени при постоянных напряжениях и влажности просадочного грунта.*

Складність і різноманіття властивостей лесових просадочних ґрунтів змушує при аналізі їх напружено-деформованого стану вдаватися до схематизації просадочних явищ, що виникають в цих ґрунтах. При цьому допускаються деякі спрощення, які дозволяють на основі ідеалізованого уявлення про найскладніші властивості просадочних деформацій лесових ґрунтів побудувати розрахункову схему за допомогою доступних реологічних моделей. Для опису ґрунтового середовища існують різні реологічні моделі. Широко використовуються моделі дво- і трикомпонентного ґрунтового