

УДК 622.235

В.Г. Кравець, д.т.н.
Національний технічний університет України "КПІ"
Тадеуш Рембеляк, доктор-інж.
Краківська гірничо – металургійна академія
В.В. Вапнічна, аспір.
Національний технічний університет України "КПІ"

МЕХАНІЧНИЙ ЕФЕКТ ВИБУХУ В ҐРУНТІ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛІНІЙНОГО ЗАРЯДУ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ

В статті визначено технологічні параметри системи вертикальних лінійних зарядів викидання, встановлено залежність між фізико – механічними характеристиками ґрунту та енергетичними параметрами лінійного заряду комбінованої дії.

1. Вступ

Ідея використання систем вертикальних зарядів не лише для отримання камуфлетних порожнин, а й для утворення виїмок викидання пов'язана в першу чергу з відсутністю відповідної техніки виконання земляних підготовчих робіт. Крім того, існуючий досвід свідчить про ефективність способу вертикальних зарядів викидання. По-перше, покращується показник стійкості стінок зарядної порожнини, особливо важливий в структурно-нестійких ґрунтах. По-друге, при спорудженні протяжних виїмок великої глибини траншейний метод втрачає свою технологічну привабливість через складність отримання глибокої зарядної траншеї, особливо коли глибина каналу, що проектується, перевищує можливості існуючої техніки влаштування траншей, до того ж із стійкими боковими стінками. Через ці труднощі вартість спорудження однієї зарядної траншеї, що потребує достатньо міцного і надійного кріплення, стає порівняльною з вартістю всієї інженерної споруди в цілому.

Тому цілком зрозуміла поява альтернативного рішення – отримання подовженої виїмки викидання вибухом системи вертикальних (свердловинних зарядів). Звичайно, дослідників і практиків цікавили особливості дії таких зарядів у приповерхневих шарах ґрунту [1, 2, 3, 4], де проявляється ефект викидання.

Оскільки свердловина на відміну від траншеї має фіксований поперечний розмір, маса заряду в свердловині може регулюватись в основному довжиною свердловинного заряду. Проте довжина свердловинного заряду викидання не може зростати безмежно, оскільки при певному заглибленні він починає працювати як камуфлетний. Що ж до того, яка частина вертикального подовженого заряду діятиме на викидання при його розташуванні біля поверхні, потрібно виконати спеціальні дослідження.

При визначенні раціонального розміщення потрібної кількості ВР в свердловинах слід враховувати, що верхня частина заряду буде працювати менш корисно внаслідок близькості вільної поверхні. В нижній частині свердловини, якщо умови роботи заряду близькі до камуфлетних, ККД вибуху на викидання теж зменшується. Розглянемо розрахункову схему дії вертикального заряду викидання, розташованого нормально до площини вільної поверхні.

2. Розрахунок механічного ефекту подовженого заряду викидання

Розглянемо задачу вибуху на викидання вертикального подовженого заряду в імпульсно-гідродинамічній постановці.

Візьмемо вертикальне подовжене джерело довжиною ℓ_0 , заглиблене на величину h . Виберемо систему координат так, щоб вісь Z співпала з віссю джерела, а вісь Y – з поверхнею ґрунту. Вплив вільної поверхні замінюється дзеркально відображенням стоком (рис. 1).

Візьмемо довільну точку середовища $B(r, Z)$ і визначимо потенціал швидкості в цій точці від джерела " φ_1 " і стоку " φ_2 ":

$$\varphi_1(Z) = -\varphi_2(-Z),$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (1)$$

Для визначення потенціалу швидкості від подовженого джерела виділимо на ньому елемент $d\ell$ інтенсивністю A . Тоді прирощення потенціалу точки $B(r, Z)$, розташованої на відстані R від елемента $d\ell$ джерела, буде:

$$d\varphi_1 = \frac{dm}{R} = \frac{Ad\ell}{R} = \frac{Ad\ell}{\sqrt{r^2 + (h + \ell - Z)^2}}, \quad (2)$$

де $R = \sqrt{r^2 + (h + \ell - Z)^2}$.

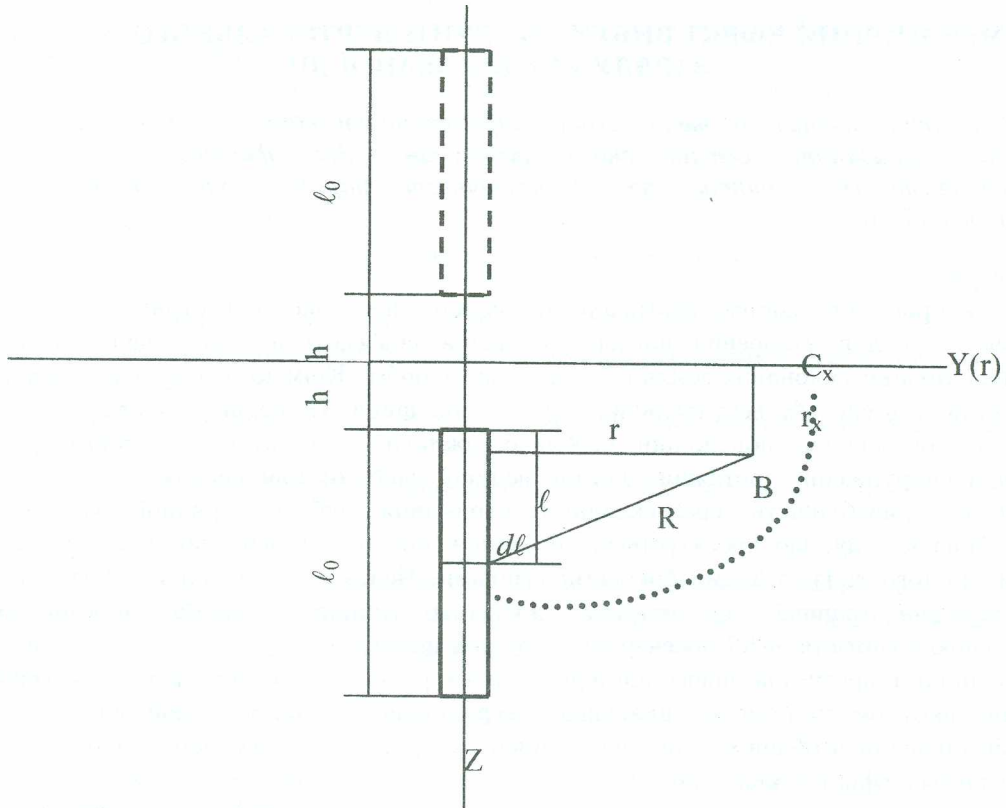


Рис. 1. Схема дії подовженого вертикального заряду в гідродинамічній постановці

Звідси

$$\varphi_1 = \int_0^{\ell_0} \frac{Ad\ell}{\sqrt{r^2 + (h + \ell - Z)^2}}. \quad (3)$$

Позначаємо $x = h + \ell - Z$, отримаємо:

$$\varphi_1 = A \int_{h-Z}^{h+\ell_0-Z} \frac{dx}{\sqrt{x^2 + r^2}} = A \ln \frac{h + \ell_0 - Z + \sqrt{(h + \ell_0 - Z)^2 + r^2}}{h - Z + \sqrt{(h - Z)^2 + r^2}}. \quad (4)$$

Звідси потенціал φ_2 отримуємо заміною Z на $-Z$ і A на $-A$

$$\varphi_2 = -A \ln \frac{h + \ell_0 + Z + \sqrt{(h + \ell_0 + Z)^2 + r^2}}{h + Z + \sqrt{(h + Z)^2 + r^2}}. \quad (5)$$

Звідси, виходячи з (1), отримуємо:

$$\varphi = A \left\{ \ln \frac{h + \ell_0 - Z + \sqrt{(h + \ell_0 - Z)^2 + r^2}}{h - Z + \sqrt{(h - Z)^2 + r^2}} - \ln \frac{h + \ell_0 + Z + \sqrt{(h + \ell_0 + Z)^2 + r^2}}{h + Z + \sqrt{(h + Z)^2 + r^2}} \right\}. \quad (6)$$

Визначимо складову швидкості поля V_z , яка направлена в сторону вільної поверхні:

$$V_z = \frac{\partial \varphi}{\partial Z} = A \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ \begin{aligned} & \ln \left[h + \ell_0 - Z + \sqrt{(h + \ell_0 - Z)^2 + r^2} \right] - \ln \left[h - Z + \sqrt{(h - Z)^2 + r^2} \right] - \\ & - \ln \left[h + \ell_0 + Z + \sqrt{(h + \ell_0 + Z)^2 + r^2} \right] + \ln \left[h + Z + \sqrt{(h + Z)^2 + r^2} \right] \end{aligned} \right\} =$$

$$= A \left\{ \begin{aligned} & \frac{-1 + \frac{1}{2} \frac{2(Z - h + \ell_0)}{\sqrt{(h + \ell_0 - Z)^2 + r^2}}}{h + \ell_0 - Z + \sqrt{(h + \ell_0 - Z)^2 + r^2}} - \frac{-1 + \frac{1}{2} \frac{2(Z - h)}{\sqrt{(h - Z)^2 + r^2}}}{h - Z + \sqrt{(h - Z)^2 + r^2}} - \\ & - \frac{-1 + \frac{1}{2} \frac{2(h + \ell_0 + Z)}{\sqrt{(h + \ell_0 + Z)^2 + r^2}}}{h + \ell_0 + Z + \sqrt{(h + \ell_0 + Z)^2 + r^2}} + \frac{1 + \frac{1}{2} \frac{2(h + Z)}{\sqrt{(h + Z)^2 + r^2}}}{h + Z + \sqrt{(h + Z)^2 + r^2}} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Визначимо V_z на поверхні, тобто при $Z = 0$:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right|_{Z=0} = 2A \left\{ \frac{-1 - \frac{h + \ell_0}{\sqrt{(h + \ell_0)^2 + r^2}}}{h + \ell_0 + \sqrt{(h + \ell_0)^2 + r^2}} - \frac{-1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}}}{h + \sqrt{h^2 + r^2}} \right\} = 2A \left\{ \frac{1}{\sqrt{h + r^2}} - \frac{1}{(h + \ell_0)^2 + r^2} \right\}. \quad (8)$$

При критичній швидкості на поверхні середовища $\frac{\partial \varphi}{\partial Z} = C_*$, радіус воронки викидання дорівнює критичному радіусу: $r = r_*$. Позначимо $W = h + \ell_0 / 2$ і введемо показник дії вибуху:

$$n = \frac{r_*}{h + \ell_0 / 2} = \frac{r_*}{W}.$$

Тоді з попереднього виразу маємо:

$$C_* = \frac{2A}{W} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(h/W)^2 + n^2}} - \frac{1}{\sqrt{[(h + \ell_0)/W]^2 + n^2}} \right\}. \quad (9)$$

З рівняння (9) можна побудувати епюри швидкостей на поверхні ґрунту. Результати розрахунків (виконаних на ЕОМ, табл.1п стор. 158- 161), приведені на рис. 2 при значенні параметра $A = 500 \text{ м/с}^2$ [10].

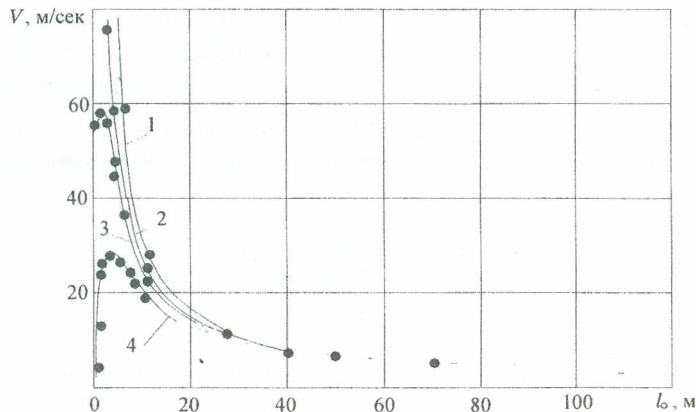


Рис. 2. Епюри зміни швидкості на поверхні ґрунту залежно від довжини заряду ℓ_0 , м при $A = 500 \text{ м}^2/\text{с}$ і довжині набивки $h = 0(1); 0,2 \text{ м}(2); 0,5 \text{ м}(3); 1,0 \text{ м}(4)$.

При подальшому розрахунку вся складність полягає в тому, щоб зв'язати з енергією вибуху величину A . В [5], [6] розглядають циліндричний заряд довжиною ℓ_0 та радіусом r_0 в нескінченному середовищі (камуфлетний випадок) і розраховують кінетичну енергію середовища, яка за припущенням складає η -ну частину всієї енергії ВР. Опускаючи деталі розрахунків, приводимо кінцевий результат:

$$\eta \cdot \rho_{ВР} \cdot \varepsilon_{ВР} \cdot Q = \ell_0 \cdot 2\pi\rho \cdot A^2 \cdot \ln \frac{((\ell_0/2)^2 + r_0^2)}{r_0^2}, \quad (10)$$

звідки наближено

$$A^2 = \frac{\eta \cdot \rho_{ВР} \cdot \varepsilon_{ВР} \cdot Q}{4\pi \cdot \rho \cdot \ln(\ell_0/2r_0)}. \quad (11)$$

Тоді з формули (9), з урахуванням (11), отримуємо:

$$Q = \frac{C_s^2 \cdot 4\pi \cdot \rho \cdot \ln(\ell_0/2r_0)}{\eta \cdot \rho_{ВР} \cdot \varepsilon_{ВР}} \cdot W^3 \left[\frac{1}{\sqrt{(h/W)^2 + n^2}} - \frac{1}{\sqrt{[(h+\ell_0)/W]^2 + n^2}} \right]^{-2}. \quad (12)$$

Цей вираз можна розглядати як розрахункову формулу для свердловинного заряду викидання:

$$Q = KW^3 \left[\frac{1}{\sqrt{(h/W)^2 + n^2}} - \frac{1}{\sqrt{[(h+\ell_0)/W]^2 + n^2}} \right]^{-2} \cdot \ln\left(\frac{\ell_0}{2r_0}\right), \quad (13)$$

де через K позначені всі сталі величини:

$$K = \frac{C_s^2 \cdot 4\pi \cdot \rho}{\eta \cdot \rho_{ВР} \cdot \varepsilon_{ВР}}.$$

В окремому випадку, при відсутності забійки, тобто при величині $h=0$ $W = \frac{\ell_0}{2}$, з (12) отримаємо:

$$Q = KW^3 \left[\frac{1}{n} - \frac{1}{\sqrt{4+n^2}} \right]^{-2} \cdot \ln(n). \quad (14)$$

3. Розв'язок за схемою МІГМ

Нехай як розрахункової схеми візьмемо модифіковану імпульсну гідродинамічну модель, описану в [7,8].

Виділимо на подовженому заряді (рис.1) малу ділянку $d\ell$ на відстані ℓ від верхнього кінця заряду. Дія вибуху цього елементарного заряду відповідає дії точкового гідродинамічного джерела з потужністю, пропорційною $g_e \cdot d\ell$, де g_e енергія ВР, що припадає на одиницю довжини. Потужність елементарного джерела повинна залежати від глибини його розташування [7]. З цих міркувань приходимо до наступного виразу для потенціалу швидкостей, що відповідає елементарному джерелу:

$$d\varphi_1 = \frac{dm}{4\pi R} = \frac{g_e \cdot d\ell}{\sqrt{r^2 + (h + \ell - Z)^2} \cdot 4\pi\rho C (h + \ell)}, \quad (15)$$

де ρ щільність середовища, C стала з розмірністю швидкості.

Інтегрування цього виразу по ℓ від 0 до ℓ_0 призводить до наступної формули:

$$\varphi_1 = \frac{g_e}{4\pi\rho C} \left\{ \ln \frac{r^2 + Z^2 - Zh + \sqrt{(r^2 + Z^2)[(h - Z)^2 + r^2]}}{r^2 + Z - Z(h + \ell_0) + \sqrt{(r^2 + Z^2)[(h + \ell_0 - z)^2]}} \cdot \frac{h + \ell_0}{\ell_0} \right\}, \quad (16)$$

Потенціал φ_2 для лінійного стоку отримується з цього виразу заміною g_e на $-g_e$ і Z на $-Z$. Далі визначаємо значення вертикальної складової швидкості $\frac{\partial\varphi}{\partial Z}$ на вільній поверхні, тобто при $Z = 0$. З урахуванням формули (1) $\frac{\partial\varphi_1}{\partial Z}$, що отримуємо з (16) при $Z = 0$, подвоюється. Виконавши розрахунки, отримуємо:

$$V(r) = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial Z} \right)_{Z=0} = \frac{g_e}{2\pi\rho Cr^2} \left\{ \frac{\ell_0 + h}{\sqrt{(\ell_0 + h)^2 + r^2}} - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right\}. \quad (17)$$

Координата краю воронки викидання отримується з умови $V(r) = C$. Позначимо через $Q_c = g_e \cdot \ell_0$ загальну енергію заряду. Для перерахунку енергії вибуху на масу ВР введемо ε -питому енергію ВР, а також ККД вибуху η . Вводячи ці позначення у (16), отримуємо:

$$\frac{Q_c}{\varepsilon\eta} = Q = KW^2 n^2 \ell_0 \left[\frac{1 + \frac{\ell_0}{2W}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\ell_0}{2W}\right)^2 + n^2}} - \frac{1 - \frac{\ell_0}{2W}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\ell_0}{2W}\right)^2 + n^2}} \right]^{-1}. \quad (18)$$

В емпіричному множнику K зібрані всі числові коефіцієнти і параметри, які залежать від властивостей ґрунту і ВР:

$$K = 2\pi\rho C_* \cdot C / \varepsilon\eta. \quad (19)$$

Вираз (18) можна також розглядати як розрахункову формулу для свердловинного вертикального заряду викидання.

4. Порівняльний аналіз результатів обчислень

Приймаючи у виразі (17) $\frac{h}{\ell_0} \ll 1$ і $\frac{r}{\ell_0} \ll 1$, отримуємо з точністю до членів другого порядку малості:

$$V(r) = \frac{g_e}{2\pi\rho C} \cdot \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} - \frac{9h^2}{8\ell_0^2} - \frac{1r^2}{2\ell_0^2} + \dots \right). \quad (20)$$

Очевидно, що при $\ell_0 \rightarrow \infty$ в кінцевій околиці епіцентру вибуху доволі швидко встановлюється поле швидкостей, яке не залежить від довжини заряду:

$$V(r) = \frac{g_e}{2\pi\rho C} \cdot \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right). \quad (21)$$

Звідси, впливає зокрема, що на викидання працює лише верхня частина заряду. Користуючись виразом (21), оцінимо граничну довжину заряду викидання. Нехай в (21) для спрощення $h = 0$, тоді маємо:

$$r_* \sim \ell_0 \sim \left(\frac{g_e}{2\pi\rho C \cdot C_*} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

Порівнюючи цей вираз з (19) і беручи до уваги, що $g_e = \pi\rho_0 r_0^2 \varepsilon\eta$, де ρ_0 – щільність ВР, r_0 – радіус заряду, отримуємо:

$$\frac{\ell_0}{r_0} \sim \sqrt{\frac{\pi \rho_0}{K}} \quad (23)$$

Прийmemo $K_1 = 1,6 \text{ кг/м}^3$ (сухий пісок), $K_2 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ (суглинок) [4], $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ [9], Із (23) отримаємо: для сухого піску $\frac{\ell_0}{r_0} \cong 46$, для суглинка $\frac{\ell_0}{r_0} \cong 54$. Отже, довжина заряду викидання не перевищує 23 діаметрів заряду для сухого піску і $27 d_s$ – для суглиноків. При збільшенні довжини заряду його нижня частина працюватиме на ущільнення утворюючи камуфлетну порожнину. Так, при діаметрі заряду масою $1,0 \text{ кг/м}$, $d_s = 0,032 \text{ м}$ та його довжині $\ell_s = 10 \text{ м}$ на викидання в суглинку працюватиме лише його верхня частина довжиною $\ell_0 = 27 \cdot 0,032 = 0,87 \text{ м}$, решта заряду утворюватиме камуфлетну порожнину.

5. Висновки

Виконані розрахунки дозволяють визначити технологічні параметри системи вертикальних лінійних зарядів викидання, в яких пов'язано залежність між фізико-механічними характеристиками оброблюваного ґрунту та енергетичними параметрами заряду. Отримані результати матимуть також вирішальне значення для розробки технології армування слабого водонасиченого ґрунту системою паль-дрен або при спорудженні геотехнічних об'єктів типу "стіна в ґрунті", якщо ці споруди виконуються комбінованим вибуховим способом. Спосіб передбачає розташування над зарядом шару або ємності з заповнювачем і переміщення його під дією сили тяжіння в утворену вибухом циліндричну порожнину. При проектуванні вибухових робіт в таких умовах необхідно знати, яка частина вертикального лінійного заряду, що прилягає до нижньої границі ємності чи шару з заповнювачем, працюватиме на викидання, а отже, – які параметри ємності слід прийняти, щоб узгодити процеси утворення вибухової порожнини та її заповнення призначеним для цього матеріалом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Афонин В.Г., Гейман Л.М., Комир В.М.* Взрывные работы в строительстве – К.: Будівельник. – 1971. – 175 с.
2. *Афонин В.Г., Гейман Л.М., Комир В.М.* Справочное руководство по взрывным работам в строительстве. – К.: Будівельник. – 1974. – 361 с.
3. *Курузов Б.Н.* Проектирование взрывных работ. – М.: Недра. – 1974. – 328 с.
4. *Технические правила введения взрывных работ на дневной поверхности.* – М.: Недра – 1972. – 240 с.
5. *Поляк Э.Б.* Струйная гидродинамическая модель взрыва на выброс. – Новосибирск: ИГД СОАН СССР, 1975. – 98 с.
6. *Поляк Э.Б.* О форме воронки выброса при взрыве вертикальных зарядов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – № 3. – Новосибирск: 1974. – С. 118–122.
7. *Кузнецов В.М.* Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука СО АН СССР, 1977. – 262 с.
8. *Кузнецов В.М., Труфанов Н.А.* О взрыве на выброс удлиненных вертикальных зарядов ВВ. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 1. – Новосибирск: 1983 – С. 16–20.
9. *Смирнов А.Г., Писарев Ю.А.* Применение энергии взрыва на объектах ирригационного и мелиоративного строительства в грунтах. – К.: Знание – 1976. – 94 с.
10. *Труфанов М.А.* Разработка методов повышения эффективности зарядов выброса при строительстве широкопрофильных выемок в сложных грунтовых условиях. – 1991. – 156 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;
- гірництво;
- геобудівництво.

Тел.: 441-10-84;

E-mail: undergeo@svitonline.com.

РЕМБЄЛЯК Тадеуш – доктор-інженер Краковської гірничо-металургійної академії.

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- фізичні процеси гірничого виробництва.

ВАПНІЧНА Вікторія Вікторівна – аспірант кафедри геобудівництва та гірничих технологій Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;

Тел.: 441-10-84;

E-mail: undergeo@svitonline.com.

Подано 12.11. 2003