

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДІЇ ВИБУХУ НА ВИКИД ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАРЯДІВ СКІНЧЕННИХ РОЗМІРІВ В ОДНОРІДНИХ СЛАБОЗВ'ЯЗАНИХ ГРУНТАХ

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

*Определены корреляционные зависимости размеров выемок выброса от основных параметров взрыва горизонтальных цилиндрических зарядов конечных размеров в однородном слабосвязанном грунте на основе обработки результатов экспериментов с использованием теории подобия и размерности.*

Здійснювані біля денної поверхні землі вибухи промислових і спеціальних вибухових речовин (ВР) завжди пов'язані з утворенням воронок (виїмок) викиду чи руйнування. Хоч ця проблема вивчається багато десятиків років як теоретично, так і експериментально і відображена в сотнях відкритих публікацій, її розв'язок далекий від завершення. Такий стан досліджень з проблеми обумовлений багатьма причинами, в першу чергу багатостадійністю процесу вибуху біля вільної поверхні. Кожна з стадій процесу залежить від багатьох факторів, які або складно, або зовсім неможливо визначити. Тому дослідники вивчають цю проблему з різних сторін і різними методами: емпірично, емпіроаналітично, на основі математичних моделей з застосуванням чисельних методів, за допомогою фізичного моделювання тощо.

Зокрема, у праці [1] з використанням теорії подібності та розмірностей обґрунтована методика визначення параметрів вибухів сферичних і скінченної довжини горизонтальних циліндричних зарядів в однорідних і шаруватих грунтах для отримання воронки і виїмок. З використанням цієї методики були визначені кореляційні залежності розмірів воронки викиду від основних параметрів вибуху сферичного заряду ВР в слабозв'язаному однорідному [2] і двошаровому [3] ґрунті.

Розглянемо питання про застосування розробленої методики [1] для випадків вибуху циліндричних зарядів скінченних розмірів в однорідних слабозв'язаних грунтах, оскільки в більшості практичних випадків якраз і мають справу з зарядами скінченних розмірів.

Якщо за базу порівняння при зміні умов підривання (довжина заряду  $l$  не дорівнює глибині закладання  $w$  ( $l \neq w$ ) для циліндричних зарядів, уведення шаруватості тощо) прийняти вибух сферичного і горизонтального циліндричного заряду при  $\pi_2^H = l/w = 1$  в однорідному слабозв'язаному ґрунті, то виходячи з цього та з загальних положень методики [1] для вибухів в однорідних грунтах, функціональні залежності для основних розмірів воронки (виїмки) в цих умовах логічно шукати у вигляді:

для сферичних зарядів

$$\frac{R}{w}, \frac{H}{w}, \frac{S}{w^2}, \frac{V}{w^3} = f_i(\pi_1^{\text{II}}); \quad (1)$$

для горизонтальних циліндричних зарядів

$$\frac{R}{w}, \frac{H}{w}, \frac{L}{w}, \frac{S}{w^2}, \frac{V}{w^3} = f_j(\pi_1^{\text{II}}) f_j(\pi_2^{\text{II}}), \quad (2)$$

де  $R$  – радіус поверху;  $H$  – видима глибина;  $L$  – довжина виїмки;  $S$  – поперечний переріз;  $V$  – об’єм воронки (виїмки) після вибуху горизонтального циліндричного заряду);  $\pi_1^{\text{c}} = E w^{-\frac{11}{3}} \alpha_1^{\frac{1}{3}} (\rho_0 g)^{-\frac{2}{3}} P_0^{-\frac{1}{3}}$  – безрозмірний комплекс для сферичного заряду;  $\pi_1^{\text{II}} = E_l w^{-\frac{8}{3}} \alpha_1^{\frac{1}{3}} (\rho_0 g)^{-\frac{2}{3}} P_0^{-\frac{1}{3}}$  – безрозмірний комплекс для циліндричного заряду;  $E$  і  $E_l$  – повна енергія вибуху сферичного заряду і горизонтального циліндричного заряду одиничної довжини;  $l$  і  $w$  – довжина і глибина закладання заряду;  $\alpha_1$  і  $\rho_0$  – вільна пористість і щільність ґрунту;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $P_0$  – атмосферний тиск;  $f_i$  та  $f_j$  – поправочні функції на умови підривання (невідомі безрозмірні функції свого безрозмірного аргументу, які підлягають поетапному визначенню експериментальним шляхом).

Умови проведення експериментів і результати їх опрацювання з метою визначення функцій  $f_i(\pi_1^{\text{II}})$  наведені в [2].

Для визначення функцій  $f_j(\pi_1^{\text{II}})$  і  $f_j(\pi_2^{\text{II}})$  було проведено дві серії дослідів, а також використані наявні в джерелах дані про результати вибухів на викид в однорідних ґрунтах циліндричних горизонтальних зарядів [4, 5, 6]. У першій серії дослідів змінювалась величина параметра  $\pi_1^{\text{II}}$  шляхом зміни значень  $E_l$  і  $w$  при  $\pi_2^{\text{II}} = 1$ . У другій серії змінювали відношення  $l/w$ , тобто  $\pi_2^{\text{II}} = \text{var}$ , а значення функцій  $f_j(\pi_2^{\text{II}})$  визначалися в припущенні, що вони не залежать від величини  $\pi_1^{\text{II}}$  і повністю визначаються величиною параметра  $\pi_2^{\text{II}}$ , що в подальшому отримало своє підтвердження.

Відмінність такого підходу до вивчення дії горизонтальних циліндричних зарядів викиду від раніше відомих уявлень [5, 7, 8] полягає в тому, що вплив довжини заряду враховується через параметр  $l/w$ , а не через  $l/d$  ( $d$  – діаметр заряду).

Дослідження [7] показали, що побудувати єдині залежності  $f_j(l/d)$  для широкого діапазону зміни енергетичного потенціалу заряду не вдається, оскільки для кожної конкретної величини безрозмірної енергії існує своя  $f_j(l/d)$ .

Досліди перших двох серій виконувалися в кварцовому середньозернистому піску:  $\rho_0 = 1550 \dots 1670$  кг/м<sup>3</sup>, вологість 2...5 %,  $\alpha_1 = 0,32 \dots 0,396$ . Як ВР використовували циліндричні заряди гексогену (питома енергія  $E^* = 5,36$  МДж/кг) і пластичної ВР на основі гексогену ( $E^* = 4,87$  МДж/кг).

У першій серії дослідів довжина заряду  $l = 0,04...0,33$  м; діаметр заряду  $d = 0,0075...0,035$  м; щільність  $\rho_{\text{ВР}} = 1050...1500$  кг/м<sup>3</sup>. Ініціювання зарядів виконувалося за допомогою електродетонаторів ЕД-8Е, які встановлювалися з торця заряду на  $\frac{2}{3}$  довжини детонатора. Маса ВР детонатора додавалася до маси основного заряду. Подальші дослідження параметрів воронки показали, що енергія вибуху детонатора не впливає помітно на симетрію воронки викиду.

У другій серії дослідів довжина зарядів  $l = 0,12...0,79$ , а глибина їх закладання  $w = 0,01...0,31$  м.

Перша група дослідів, результати яких наведені в [5] і використані для встановлення функцій  $f_j(\pi_2^{\text{II}})$ , проведена з тетриллом ( $E^* = 4,61$  МДж/кг), а друга – з тротилом ( $E^* = 4,23$  МДж/кг). В усіх дослідах маса заряду становила 0,0322 кг, глибина закладання 0,2 м. Щільність піску  $\rho_0 = 1780$  кг/м<sup>3</sup> за вологості 6 %. З кожним зарядом (значення  $l/d$  для яких послідовно дорівнювали 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 і 32, а в дослідах з тетриллом додатково  $l/d = 64$ ) проводили по три досліди.

При встановленні функції  $f_j(\pi_2^{\text{II}})$  були використані також результати [6], отримані в бурих суглинках щільністю 1700...1900 кг/м<sup>3</sup> і вологістю 18...20 % та в супісках щільністю 1900 кг/м<sup>3</sup> і вологістю 10 %. Як ВР використовували амоніт № 6ЖВ. Довжина зарядів становила  $3,5R$  ( $R$  – радіус виїмки). Глибина закладання  $w = 0,5...2$  м; питома лінійна щільність заряду становила 0,5...190 кг/м.

Графічні залежності безрозмірних параметрів воронки (виїмки) викиду від безрозмірних комплексів  $\pi_1^{\text{c}}$  та  $\pi_1^{\text{II}}$  зображені на рис. 1–3 і характеризують механічну дію вибухів сферичних і горизонтальних циліндричних (при  $l/w = 1$ ) зарядів (ГЦЗ) викиду в однорідних слабозв’язаних ґрунтах.

Окремий інтерес викликає те, що при  $l = w$  залежності  $\frac{R}{w}$ ,  $\frac{H}{w}$ ,  $\frac{S}{w^2}$  від  $\pi_1^{\text{c(II)}}$  для вибухів сферичних зарядів і ГЦЗ збігаються. Розглянемо це більш детально. Помноживши безрозмірний комплекс  $\pi_1^{\text{II}}$  на безрозмірний параметр  $l/w$ , отримаємо:

$$\frac{E_l \alpha_1^{\frac{1}{3}}}{w^{\frac{8}{3}} (\rho_0 g)^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{l}{w} = \frac{E \alpha_1^{\frac{1}{3}}}{w^{\frac{11}{3}} (\rho_0 g)^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}}}, \quad (3)$$

тобто  $\pi_1^{\text{II}} l/w = \pi_1^{\text{c}}$ . Звідси випливає, що для вибухів в однакових ґрунтових умовах сферичних зарядів і ГЦЗ однакової загальної маси при однаковій глибині їх закладання і при дотриманні для ГЦЗ умови  $l/w = 1$  отримуємо  $\pi_1^{\text{c}} = \pi_1^{\text{II}}$  і, виходячи з зображених на рис.1–3 залежностей, можна сформулювати висновок, що безрозмірні півширина, глибина і переріз воронки (виїмок) викиду під час вибуху зарядів для цих форм відповідно однакові.

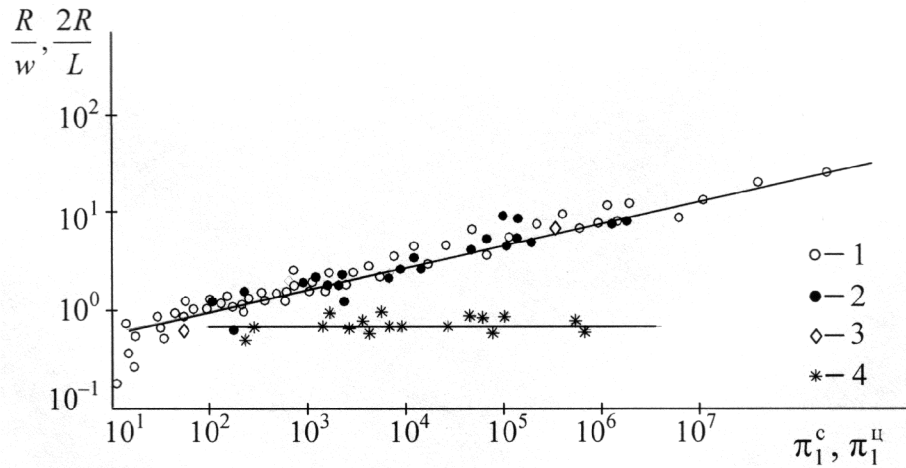


Рис. 1. Залежності безрозмірної півширини  $\frac{R}{w}$  і коефіцієнта асиметрії  $\frac{2R}{L}$  воронки (виїмки) викиду від безрозмірних комплексів для сферичних  $\pi_1^c$  і циліндричних  $\pi_1^{II}$  зарядів: 1, 2 і 3 – для сферичних, горизонтальних циліндричних і ядерних зарядів; 4 –  $\frac{2R}{L} = f(\pi_1^{II})$ ;  $L$  – довжина воронки по верху

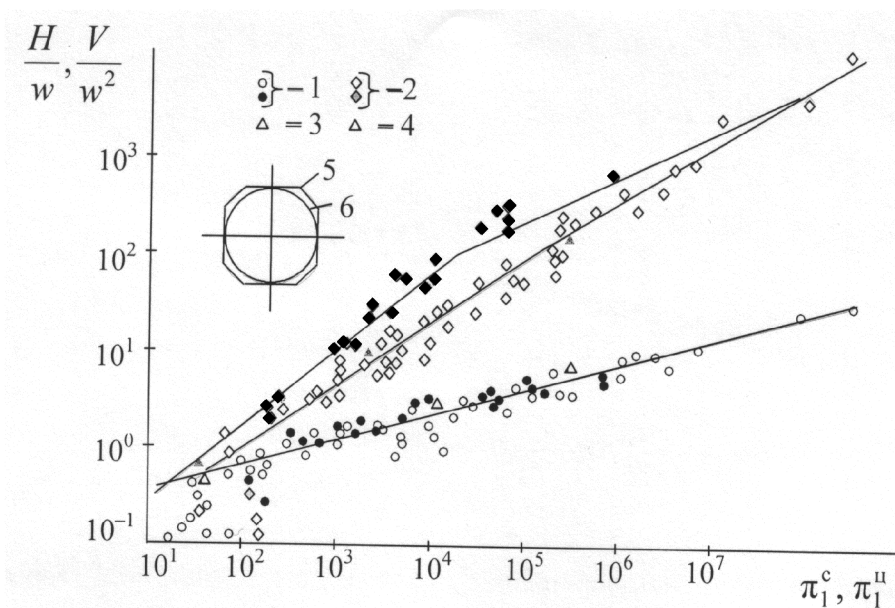


Рис. 2. Залежність безрозмірної глибини  $\frac{H}{w}$  і безрозмірного об'єму  $\frac{V}{w^3}$  воронки (виїмки) викиду від безрозмірних комплексів для сферичних  $\pi_1^c$  і циліндричних  $\pi_1^{II}$  зарядів: 1 –  $\frac{H}{w} = f_n(\pi_1^c)$ ,  $\frac{H}{w} = f_n(\pi_1^{II})$ ; 2 –  $\frac{V}{w^3} = f_v(\pi_1^c)$ ,  $\frac{V}{w^3} = f_v(\pi_1^{II})$ ; 3 і 4 відповідно  $\frac{H}{w} = f_n(\pi_1^c)$  і  $\frac{V}{w^3} = f_v(\pi_1^c)$  – для вибухів ядерних зарядів; 5 і 6 – форма виїмки (воронки) в плані під час вибухів циліндричних і сферичних зарядів. Світлі і темні точки відносяться відповідно до вибухів сферичних і циліндричних зарядів

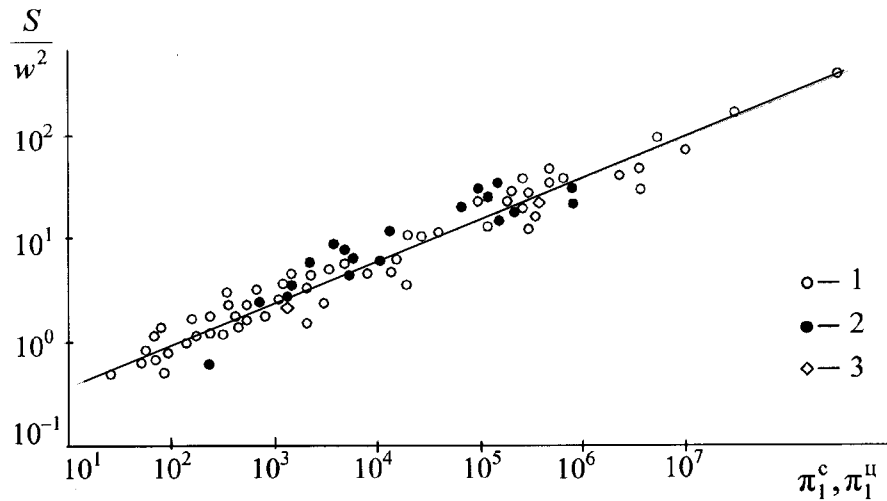


Рис. 3. Залежність безрозмірної площі вертикального перерізу воронки (виїмки) викиду від безрозмірних комплексів для сферичних  $\pi_1^c$  і циліндричних  $\pi_1^{II}$  зарядів: 1, 2 і 3 відносяться до вибухів сферичних, циліндричних і ядерних зарядів

У той же час з аналізу наведеної на рис. 2 залежності  $\frac{V}{w^3} = f_v(\pi_1^{c(II)})$  випливає, що за зазначених вище умов об'єм викиду під час вибуху ГЦЗ більший, ніж під час вибуху рівного йому за масою сферичного заряду. Пояснити це можна, аналізуючи форми воронок (виїмок) викиду в плані. Після вибуху сферичного заряду воронка в плані має форму круга, тоді як після вибуху ГЦЗ виїмка має форму, зображену на рис. 2, причому довжина воронки дорівнює її ширині (про це свідчить те, що в досліджуваному діапазоні значень  $\pi_1^{II}$  значення коефіцієнта асиметрії виїмки  $k_a = \frac{2R}{L} = 1$ ) (див. рис. 1). Зі збільшенням параметра  $\pi_1^{II}$  більше величини  $\pi_1^{II*} \approx 10^7$  і зі зменшенням  $\pi_1^{II}$  менше  $\pi_1^{II**} \approx 10^2$  відмінність у об'ємах воронок (виїмок), утворених під час вибухів сферичних зарядів і ГЦЗ, зникає. Це обумовлено тим, що зі збільшенням параметра  $\pi_1^{II}$  більше певної величини  $\pi_1^{II*}$ , тобто зі збільшенням  $E_l$  при  $w = \text{const}$ , або зі зменшенням  $w$  при  $E_l = \text{const}$ , або з одночасним збільшенням  $E_l$  і зменшенням  $w$  вплив форми заряду на дію вибуху зменшується (в цих випадках зменшується відношення довжини заряду до його діаметра  $l/d$ ) і ГЦЗ за дією вибуху наближається до сферичного заряду.

Звичайно, це справедливо тільки при  $l/w = 1$ . В інших випадках ( $\pi_1^{II} < \pi_1^{II**}$ ) співвідношення між довжиною виїмки і її шириною змінюється (виявлена тенденція до зменшення  $k_a$ , а саме:  $k_a < 1$ , тобто  $L > 2R$ ). Виїмка в плані наче сплющується вздовж заряду. У цьому випадку зникають переваги ГЦЗ перед сферичним зарядом стосовно об'єму викиду після вибуху.

Аналогічно тому, як це здійснено в праці [2] для вибухів сферичних зарядів у однорідних слабозв'язаних ґрунтах, запишемо залежності (1) і (2)

параметрів виїмок викиду від визначальних параметрів вибуху ГЦЗ і ґрунту в вигляді степеневих функцій (таблиця).

Залежність безрозмірних функцій від їх безрозмірних аргументів, пов'язаних з утворенням воронки (виїмок) викиду під час вибухів сферичних (циліндричних) зарядів в однорідних слабозв'язаних ґрунтах

Кореляційна залежність	Інтервал зміни безрозмірного аргументу	Коефіцієнт кореляції
Для радіуса воронки (виїмок) викиду		
$f_R(\pi_1^c) = f_R(\pi_1^u) = 0,5764(\pi_1^{c(u)})^{0,1977}$	$28850 \leq \pi_1^c = \pi_1^u \leq 2,8 \cdot 10^8$	0,962
$f_R(\pi_1^c) = f_R(\pi_1^u) = 0,3393(\pi_1^{c(u)})^{0,2493}$	$18 \leq \pi_1^c = \pi_1^u \leq 28850$	0,936
$f_R(\pi_2^u) = 1 + 0,0953 \ln \pi_2^u$	$1 \leq \pi_2^u \leq 3,766$	0,668
$f_R(\pi_2^u) = 0,444 + 0,5146 \ln \pi_2^u$	$3,766 \leq \pi_2^u \leq 33$	0,864
$f_R(\pi_2^u) = 0,872(\pi_2^u)^{0,2276}$	$0,11 \leq \pi_2^u \leq 1$	0,964
Для видимої глибини воронки (виїмки) викиду		
$f_H(\pi_1^c) = f_H(\pi_1^u) = 0,238(\pi_1^{c(u)})^{0,2032}$	$43 \leq \pi_1^c = \pi_1^u \leq 2,8 \cdot 10^8$	0,946
$f_H(\pi_2^u) = 1 + 0,0602 \ln \pi_2^u$	$1 \leq \pi_2^u \leq 3,6$	0,674
$f_H(\pi_2^u) = 0,2693 + 0,6312 \ln \pi_2^u$	$3,6 \leq \pi_2^u \leq 33$	0,711
$f_H(\pi_2^u) = 0,3084 \pi_2^u$	$0,11 \leq \pi_2^u \leq 0,37$	0,959
$f_H(\pi_2^u) = -1,335 + 3,925 \pi_2^u$	$0,37 \leq \pi_2^u \leq 0,56$	0,962
$f_H(\pi_2^u) = 0,7 + 0,3045 \pi_2^u$	$0,56 \leq \pi_2^u \leq 1,0$	0,682
Для площі перерізу воронки (виїмки) викиду		
$f_S(\pi_1^c) = f_S(\pi_1^u) = 0,1332(\pi_1^{c(u)})^{0,423}$	$43 \leq \pi_1^c = \pi_1^u \leq 2,8 \cdot 10^8$	0,979
$f_S(\pi_2^u) = 1 + 0,2575 \ln \pi_2^u$	$1 \leq \pi_2^u \leq 4,5$	0,639
$f_S(\pi_2^u) = -1,4717 + 1,8969 \ln \pi_2^u$	$4,5 \leq \pi_2^u \leq 33$	0,834
$f_S(\pi_2^u) = -0,06 + 1,06 \pi_2^u$	$0,11 \leq \pi_2^u \leq 1,0$	0,899
Для об'єму воронки (виїмки) викиду		
$f_V(\pi_1^c) = 0,2138(\pi_1^c)^{0,5474}$	$1,2 \cdot 10^6 \leq \pi_1^c \leq 2,8 \cdot 10^8$	0,970
$f_V(\pi_1^c) = 0,0585(\pi_1^c)^{0,640}$	$43 \leq \pi_1^c \leq 1,2 \cdot 10^6$	0,974
$f_V(\pi_1^u) = 1,0769(\pi_1^u)^{0,4622}$	$17935 \leq \pi_1^u \leq 6,3 \cdot 10^5$	0,817
$f_V(\pi_1^u) = 0,0284(\pi_1^u)^{0,8333}$	$280 \leq \pi_1^u \leq 17935$	0,927

Отримані залежності можуть бути використані як для прогнозування результатів дії вибухів одиночних сферичних зарядів і ГЦЗ (при  $l = w$  за формулою (1), при  $l \neq w$  за формулою (2)) в однорідних ґрунтах, так і для

розв'язання оберненої задачі – визначення параметрів зарядів, що забезпечують плановані розміри воронки (виїмки) викиду.

Розглянемо детальніше питання про вплив довжини ГЦЗ на параметри виїмки викиду, тобто дослідимо функцію  $f_j(\pi_2^H)$ .

Опрацювання результатів експериментальних вибухів за допомогою методів математичної статистики дало, що при  $\pi_2^H \geq 1,0$  кореляційні залежності  $f_j(\pi_2^H)$  мають вигляд

$$f_j(\pi_2^H) = a_j + b_j \ln \pi_2^H, \quad (4)$$

де  $a_j, b_j$  – коефіцієнти, значення яких наведені в таблиці. Аналіз кореляційних залежностей (4) з урахуванням конкретних значень величин, що входять у них, показує, що зі збільшенням параметра  $l/w$  (це рівнозначно збільшенню довжини при рівних інших умовах) усі параметри виїмки викиду (півширина, видима глибина і площа вертикального поперечного перерізу) збільшуються. Однак, починаючи з  $l/w \approx 20$ , вплив довжини заряду стає несуттєвим, тобто заряд з цієї точки зору можна вважати нескінченним.

Очевидно, починаючи з цієї величини параметра  $\pi_2^H$ , довжина виїмки зростатиме прямо пропорційно довжині заряду, а об'єм  $V \sim l^3$ . Навпаки, зі зменшенням  $\pi_2^H$  при  $\pi_2^H < 1$  усі параметри перерізу воронки зменшуються, аж до нуля при  $\pi_2^H = 0$ , тобто при повній відсутності заряду. Аналіз отриманих залежностей показує, що функції  $f_j(\pi_2^H)$  мають різний вигляд. Зокрема, функція  $f_S(\pi_2^H)$  лінійна,  $f_R(\pi_2^H)$  і  $f_H(\pi_2^H)$  мають складніший характер.

З виконаного аналізу випливає, що для різних ґрунтових умов, типів ВР і масштабів вибухів отримані єдині вирази для  $f_j(\pi_2^H)$ . Це свідчить про те, що поправка на довжину заряду, якою, по суті, є відповідне значення функції  $f_j(\pi_2^H)$  порівняно з вибухом при  $l/w = 1$ , залежить тільки від параметра  $\pi_2^H = l/w$  і не залежить від інших умов підривання.

У подальшому авторами планується викласти результати досліджень фізичного моделювання вибухів горизонтальних циліндричних зарядів у шаруватих ґрунтах.

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

2. Лучко І. А. Результати моделювання дії вибуху на викид сферичних зарядів в однорідних слабозв'язаних ґрунтах // Вісник Національного

технічного університету України „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 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 Національного технічного університету України „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2001. – Вип. 6. – С. 17–21.

4. *Вовк А. А., Лучко І. А.* О принципе подобия при взрывах цилиндрических горизонтальных зарядов выброса // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1970. – № 11. – С. 1038–1041.

5. *Влияние формы заряда выброса на результат взрыва* / Л. И. Барон, О. Е. Власов, С. А. Смирнов, М. К. Терметчиков. – Центр. институт техн. информации, 1959. – 16 с.

6. *Азаркович А. Е., Яновский В. Н., Глушков М. Л.* Экспериментальное исследование действия линейных зарядов выброса // Горный журнал. – 1976. – № 11. – С. 31–34.

7. *Адушкин В. В., Скоморохов Н. Д.* Влияние длины линейного заряда при взрыве на выброс // Взрыв. дело. – 1979. – № 81/38. – С. 71–78.

8. *Адушкин В. В., Скоморохов Н. Д.* Исследование однорядного взрыва на выброс // Взрыв. дело. – 1980. – № 82/39. – С. 94–105.