

**COLLECTION OF RESEARCH PAPERS**

of the 8th International Research and Practical Conference

**CHEMICAL TECHNOLOGY:  
SCIENCE, ECONOMY AND PRODUCTION**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

VIII Міжнародної науково-практичної конференції

**ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ:  
НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО**



МІНІСТЕРСТВО  
ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИ



Фармак



ISSN 2786-4898

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Шосткинський інститут Сумського державного університету  
Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки збройних сил України  
Публічне акціонерне товариство «Фармак»  
Управління освіти Шосткинської міської ради  
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради

## COLLECTION OF RESEARCH PAPERS

of the 8th International Research and Practical Conference

**CHEMICAL TECHNOLOGY:  
SCIENCE, ECONOMY AND PRODUCTION**



## ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

VIII Міжнародної науково-практичної конференції  
**ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ:  
НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО**

(м. Шостка, 27-29 листопада 2024 року)



Суми

Сумський Державний Університет

2024

УДК 66.01

Редакційна колегія:

Головний редактор Закусило Р.В., доцент кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.т.н., доцент.

Заступник головного редактора Павленко О.В., завідувач кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.т.н.

Відповідальний секретар Скуба Ю.Г. фахівець кафедри економіки та управління Шосткинського інституту Сумського державного університету.

Члени редакційної колегії:

Кравець В.Г. – професор кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, д.т.н., професор;

Худолей Г.М. – завідувач кафедри системотехніки і інформаційних технологій, к.т.н;

Тур О.М. – доцент кафедри економіки та управління, к.е.н.;

Тимофіїв С.В. – ст. викладач кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук, к.х.н.;

Пригара І.О. – ст. викладач кафедри економіки та управління, к.е.н.

Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 27 - 29 листопада 2024 року. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 242 с.

ISSN 2786-4898.

Збірник містить наукові праці учасників VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», що складаються з узагальнених матеріалів науково-дослідних робіт науковців різних галузей виробництв та наукових закладів України.

У збірнику висвітлюються актуальні питання спеціальної хімічної технології і виробництва боєприпасів, утилізації відходів виробництв різних галузей, енергозбереження, моделювання технологічних процесів, соціально-економічні аспекти виробництва та природокористування в умовах війни.

Збірник корисний робітникам хімічної промисловості, науковим співробітникам, аспірантам і студентам спеціальностей хіміко-технологічного та соціально-економічного профілів, фахівцям інформаційних технологій виробництва.

Наукові праці учасників конференції подаються в авторській редакції.

© Шосткинський інститут  
Сумського державного університету, 2024  
© Сумський державний університет, 2024

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВОГО ПОЛЯ ВИБУХУ СИСТЕМИ СУМІЖНИХ ЗАРЯДІВ

В. Кравець<sup>1</sup>, Р. Закусило<sup>1</sup>, А. Шукуров<sup>2</sup>, Д. Закусило<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Шосткинський інститут Сумського державного університету

<sup>2</sup> Міністерство природних ресурсів Республіки Азербайджан, Баку

**Анотація** В роботі розглянуто особливості аналітичного описання закономірностей формування силового поля в умовах вибуху суміжних подовжених зарядів обмеженої довжини. Виконано експериментальну оцінку доцільності застосування апарату теорії пружності для моделювання зарядів осьової симетрії системою елементарних зарядів центральної симетрії з поширенням завдання на представлення заряду площинної симетрії системою паралельних осесиметричних зарядів. Встановлено рівні придатності аналітичних побудов при моделюванні систем зарядів.

**Key words.** Mechanical effect, system of charges, symmetry, force field, string, piezoelectric transducer, components of stresses, waveform

**Ключові слова.** Механічний ефект, система зарядів, симетрія, силове поле, гірлянда, п'єзодатчик, компоненти напружень, епюра.

**Вступ.** Вивчення закономірностей формування в просторі і часі поля напружень при дослідженні механічного ефекту вибуху системи зарядів в породному масиві потребує складних теоретичних побудов для описання спільної роботи суміжних полів напружень. Керування інтенсивністю та послідовністю прикладання взаємодіючих імпульсних навантажень в умовах масового вибуху на відкритих гірничих роботах покладено в основу сучасних технологічних рішень, метою яких є розробка одночасно значних об'ємів гірської маси та одночасно дотримання встановленої проектом якості подрібнення гірської маси. Сучасна техніка масового висаджування реалізується через застосування систем свердловинних зарядів, що розміщуються в руйнованому породному блоці за певною раціональною мережею і підриваються в заданій послідовності. Через складність теоретичних побудов відстані між зарядами і послідовність їх підривання переважно встановлюються емпірично з урахуванням поряд з їх геометричними параметрами та конструктивними особливостями також фізико-механічних і технологічних параметрів руйнованого середовища. Одночасно продовжуються пошуки можливостей аналітичного описання динамічних явищ, породжених системою зарядів. В рамках цих пошуків наводяться результати дослідження закономірностей формування поля напружень в системі суміжних циліндричних зарядів, виконані шляхом аналітичних розрахунків, що оснований на заміні лінійного заряду системою елементарних зосереджених зарядів.

**Огляд літератури і постановка задачі.** Звертаючись до наукового обґрунтування технологічних параметрів, науковці свої дослідження базують переважно на вивченні напружено-деформованого стану масиву, генерованого окремим свердловинним зарядом необмеженої довжини. Така постановка дозволяє застосування математичних побудов в осьовій симетрії, поширюючи ці дані розрахунків на груповий (масовий) вибух. Однак завдання суттєво ускладнюється через прояви специфічних явищ, пов'язаних з обмеженістю довжини реального свердловинного заряду, а саме - з крайовими ефектами, які виражаються в деградації силового поля в його торцевих частинах [1...3,,5]. Лише центральна частина свердловинного заряду випромінює осесиметричне силове поле і лише до певної

відстані від осі заряду. За межами цієї частини заряду він поступово уподібнюється зарядові з центральною симетрією [2,4]. В зв'язку з цим природньо в математичних побудовах моделювати короткий циліндричний заряд системою (гірляндою) центральносиметричних, тобто сферичних зарядів, певним чином розосереджених вздовж осі реального циліндричного заряду. В подальшому таке припущення дозволяє розробити апарат для вивчення нелінійних явищ, пов'язаних з динамічною взаємодією силових полів в системі подовжених зарядів обмеженої довжини. *Мета даної роботи* – уточнити рівень впливу параметрів розосередження елементарних зарядів високої симетрії, що моделюють систему більш низької симетрії, на механізм формування в системі поля напружень в часі і просторі.

**Матеріали досліджень.** Для встановлення ряду характерних закономірностей розвитку поля напружень в масиві у випадку подовженого заряду кінцевих розмірів і для спрощення рішень подовжений заряд моделюється гірляндою зосереджених зарядів з загальною масою, що дорівнює масі лінійного заряду. Складено відповідну програму розрахунку, основу на припущенні, що процес розглядається у віддалених шарах, де рівень максимальних напружень згідно з даними цього розділу допускає розв'язок задачі в пружній постановці. Алгоритм розв'язання задачі [2] полягає у розрахунку напруженого стану в певній точці масиву в зоні дії вибуху циліндричного заряду, імітованого гірляндою зосереджених зарядів. Для визначення напруженого стану в зоні дії вибуху системи зосереджених зарядів положення кожної точки масиву визначається її радіусом-вектором  $\vec{r}$  з компонентами  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$  в деякій системі координат (рис. 1). Заряди розташовуються так, щоб їх вісь збігалась з напрямком осі  $z$ . Визначення напруженого стану в обраній точці середовища  $M$  виконується за компонентами напружень на майданчиках, нормальних до осей  $X, Y, Z$  - нормальні напруження  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  і дотичні  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ .

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}. \quad (1)$$

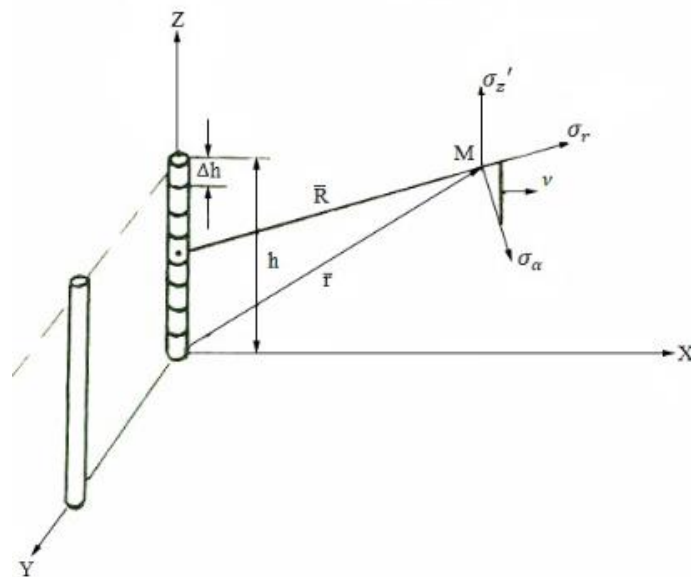


Рисунок 1. Схема до розрахунку поля напружень від вибуху лінійного заряду за принципом суперпозиції:

Радіальне напруження від вибуху заряду:

$$\sigma_R(R, t) = \sigma_{R_{max}}(r) * \frac{t * t_k}{t_{max} - t_k}; \quad t_k = \begin{cases} t_{oi} & t_{oi} \leq t \leq t_{max} \\ t_{\tau} & t_{max} \leq t \leq \tau \end{cases} \quad (2)$$

де - відстань між точкою М з координатами  $x, y, z$  та елементарним зарядом з координатами  $x_0, y_0, z_0$ ,

$t$  - поточний час,

$t_{max}$  – час наростання максимуму напруження,

$t_{\tau}$  – тривалість імпульсу,

$t_{oi}$  – час приходу імпульсу.

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (3)$$

Для визначення максимальних напружень  $R$  користуємось експериментальною залежністю:

$$\sigma_{max} = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\mu}, \quad (4)$$

де  $Q$  – маса елементарного заряду, кг,  $K = 4,5 \cdot 10^5$ .

Тангенціальна складова, нормальна дотичній  $v$ :

$$\sigma_{\alpha}(R, t) = K_{\tau} \sigma(R, t), \quad (5)$$

Результуюче напруження в точці М від  $n$  елементарних зарядів може бути знайдене шляхом підсумовування проєкції напружень  $\sigma_r, \sigma_{\alpha}, \sigma_z$  на осі  $x, y, z$  [2].

Припущення щодо можливості застосування аналітичної моделі подовженого заряду обмеженої довжини гірляндою зосереджених зарядів або плоского заряду - системою циліндричних зарядів, потребує паралельної експериментальної перевірки. Для цього виконано полігонні дослідження напруженого стану ґрунтового масиву в умовах вибуху системи двох суміжних циліндричних зарядів обмеженої довжини. Як слідує з наведеної розрахункової схеми, для визначення силових параметрів від дії системи циліндричних зарядів, поставлено завдання отримати не лише закон зміни напружень в просторі і часі від вибуху окремого циліндричного заряду, але й встановити, наскільки розосередження в системі таких зарядів вплине на інтенсивність результуючого силового поля в області дії цих зарядів. Експериментальні дослідження виконувались в супіщаному ґрунті порушеної структури з щільністю  $\rho = 1,73 \text{ т/м}^3$  і вологістю  $W=14\%$ . Дослідження силового поля за двома схемами (поодинокий циліндричний заряд з 4-х ниток ДШ і система таких зарядів в одній площині) виконувались п'єзодатчиками напружень, які встановлювались попарно в насипних шарах котловану розміром  $2,2 \times 2,2 \times 1,5$  м на відстані  $0,18 \text{ м} \dots 0,42 \text{ м}$  від системи зарядів. Площини корпусу датчиків попарно орієнтувались мембранами на окремий заряд (1-ша схема) або на площину з системи циліндричних зарядів (2-а схема) і по нормалі відповідно для вимірювання радіальної і тангенціальної компонент поля напружень з фіксацією силових і часових



параметрів вибухових імпульсів. За другою схемою датчики були встановлені двома групами - в середньому профілі в системі між зарядами і проти заряду (рис. 2).

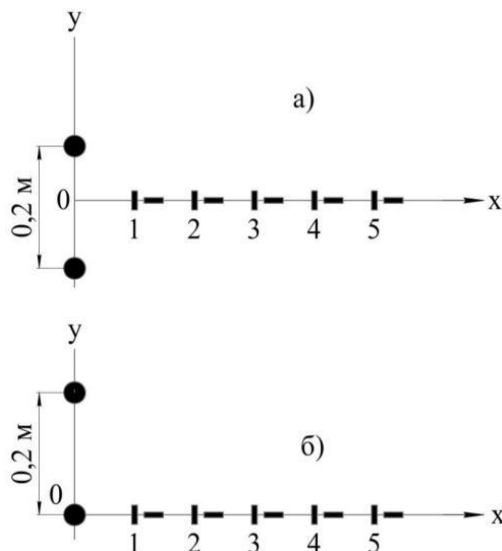


Рисунок 2 Схема вимірювання радіальних напружень від вибуху суміжних зарядів: між зарядами (а) і «на заряд» (б)

Як видно з рис. 3, на досліджуваних відстанях максимальні значення радіальних напружень  $\sigma_r$  в імпульсі спадають від  $12,0 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> до  $2,0 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, тангенціальні -  $\sigma_\alpha$  - від  $4,0 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> до  $1,0 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>.

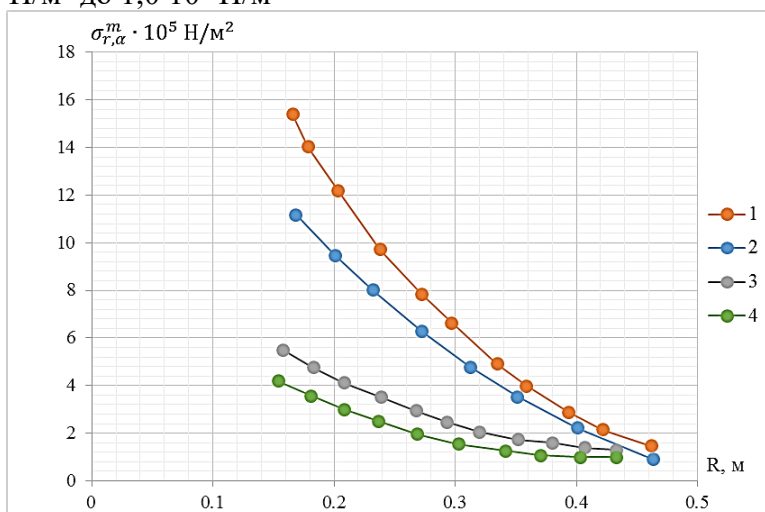


Рисунок 3 Просторовий розподіл максимальних радіальних і бічних напружень при вибуху циліндричного заряду: радіальний компонент  $\sigma_r$  (1- експеримент, 2 - розрахунок) і тангенціальний компонент  $\sigma_\alpha$  (3 - експеримент, 4 - розрахунок)

Експериментальні параметри хвиль напружень при підірванні поодинокого циліндричного заряду дозволяють застосувати розрахункову схему для визначення параметрів поля напружень від дії системи циліндричних зарядів.

Відповідно рис. 2 для першої схеми розрахункові напруження в напрямку осей X та Y становитимуть:

$$\sigma_x = 2\sigma_r \cos\alpha; \quad \sigma_y = 2\sigma_\alpha \cos\alpha \quad (6)$$

Для другої схеми сумарні напруження становлять:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{ir} + (\sigma_{2r} \text{Ctg}\alpha - \sigma_{2\alpha}) \text{Sin}\alpha \\ \sigma_y &= \sigma_{ly} + (\sigma_{2r} + \sigma_{2\alpha} \text{Ctg}\alpha) \text{Sin}\alpha \end{aligned} \quad (7)$$

За виразами (6,7) відповідно отримано значення компонентів тензора напружень у визначених точках масиву з використанням встановлених параметрів вибухових хвиль від вибуху окремого заряду. Як очікувано, розрахункові напруження по обох схемах відрізняються на близьких відстанях від зарядів, а на відстані порядку 0.3м зближуються. (рис.4).

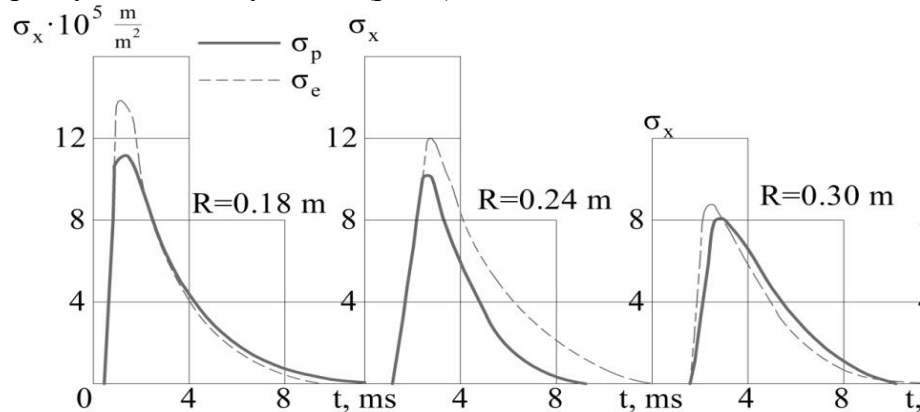


Рисунок 4. Епюри хвиль напружень за першою схемою: розраховані ( $\sigma_p$ ) та експериментальні ( $\sigma_e$ )

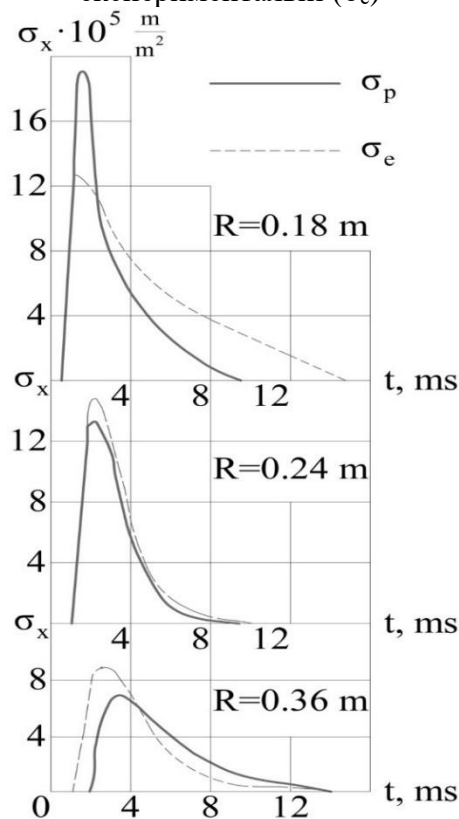


Рисунок 5 Епюри хвиль напружень за другою схемою: розраховані ( $\sigma_p$ ) та експериментальні ( $\sigma_e$ )



Це свідчить про можливість застосування наведених аналітичних залежностей в зоні, де напруження не перевищують діапазону 0,3...0,4 МПа. Ці значення дещо перевищують величину міцності дослідного ґрунту на всебічне стиснення.

**Висновок.** Співставлення даних полігонних досліджень просторово-часових параметрів вибухового імпульсу в системі суміжних подовжених зарядів з розрахунками, основаними на положеннях теорії пружності свідчить, що в більшості точок вимірювань рівня напружень їх експериментальні значення вищі від розрахункових, тобто розрахунки, основані на положеннях теорії пружності, на 10...15% занижують прогноз інтенсивності силового поля. Це означає, що в умовах, коли технологічний вибух призначається для руйнування, ущільнення або переміщення ґрунтового чи породного масиву, таке заниження створює при розрахунках певний резерв потенційної енергії зарядів, яка витрачається на корисні форми роботи вибуху.

#### **Список літературних джерел**

1. Орленко Л.П. Физика взрыва / Л.П. Орленко/ – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 2. – М.: Физматлит, 2004. – 656 с.
2. Шукюров А.М. Крайові ефекти в проектуванні масових вибухів на кар'єрах.К.:Інтерсервіс, 2022.-138с.
3. The numerical analysis of borehole blasting and application in coal mine roof-weaken/L.Chun-ruia, K.Li-jun, Q.Qing-xing, M.De-bing, L.Quan-ming, X.Gang./ The 6th International Conference on Mining Science & Technology. Procedia Earth and Planetary Science 1.-2009. – P.451–459.
4. Казаков Н.Н. Параметры процесса камуфлетного действия взрыва скважинного заряда конечной длины / Н.Н.Казаков/Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №1.-М.: 2013.-С.109-119..
5. Technological applications of border effects by hole charges system explosion/Viktor Kravets, Azer Shukurov, Roman Zakusylo, Andrij Kovtun/Materialy Wysokoenergetyczne. 2019.11(2)-S.21-30.