

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОТОЧКОВОГО ІНІЦІАТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДІЇ ВИБУХУ СВЕРДЛОВИННОГО ЗАРЯДУ

О. О. Фролов, канд. техн. наук (НТУУ „КПІ”)

Выполнен анализ метода многоточечного инициирования скважинных зарядов взрывчатых веществ. Рассмотрены способы инициирования боевиков, их пространственное расположение в скважине и рекомендованные расстояния между точками инициирования. Предложен критерий определения области эффективного применения многоточечного инициирования. Рекомендован способ определения оптимальных расстояний между боевиками в зависимости от скорости детонации взрывчатых веществ.

Для підвищення ефективності дії вибуху на кар'єрах використовуються різноманітні методи керування енергією вибуху [1, 2]. Одним з таких методів є багатоточкове ініціювання свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР). При його застосуванні створюється багатоімпульсне навантаження на стінки свердловини, що обумовлює складний напружений стан у масиві гірських порід і підвищує ефективність руйнування [3]. Чисельними дослідженнями встановлено ефективність і доцільність застосування багатоточкового ініціювання в порівнянні з традиційними методами ініціювання при підриванні свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР) [4–8]. Багатоточкове ініціювання при відповідних параметрах може мати переваги лінійного ініціювання [9, 10], однак воно значно дешевше і зручніше в застосуванні.

На сьогодні розроблено та запропоновано до використання кілька конструкцій багатоточкового ініціатора, визначено його параметри і рекомендовано різні способи розміщення його в свердловині. Зокрема, автори праці [4] при дослідженні ефективності застосування багатоточкового ініціатора розміщували проміжні детонатори по осі свердловинного заряду. Відстань між точками ініціювання становила 1 м. Ініціювання здійснювалося електродетонаторами, з'єднаними між собою за послідовною схемою, тобто бойовики підривалися одночасно.

Дослідження [5], виконані для визначення оптимальної відстані між точками ініціювання з урахуванням руху детонаційних хвиль одночасно з двох кінців заряду, дозволили встановити, що відстань між бойовиками, розміщеними по осі свердловини, повинна бути не менше 5–6 і не більше 12–14 діаметрів заряду.

Дослідницькі вибухи [6] показали, що для діаметра свердловин 118 мм найкраще подрібнення міцних пісковиків досягається при відстані між точками ініціювання 1,5 м. При збільшенні діаметра свердловин оптимальна відстань між бойовиками збільшується і становить приблизно 10 діаметрів заряду.

Істотним недоліком розглянутих конструкцій заряду є те, що підривання кожного бойовика здійснюється окремо за допомогою електродетонатора. Для свердловинних зарядів такий спосіб підривання є небезпечним і ненадійним.

У праці [7] розглядається підривання свердловинних зарядів багатоточковим ініціатором, в якому бойовики розміщені на двох нитках детонувального шнура (ДШ). Автор пропонує зміщувати точки ініціювання відносно осі циліндричного заряду до стінок свердловини в шаховому порядку. Таке асиметричне багатоточкове ініціювання циліндричного заряду дозволить підсилити ефект багаторазового навантаження руйнованого середовища. Відстань між точками ініціювання рекомендується приймати з умови, що на ділянці $(25-30)d_{\text{св}}$ (де $d_{\text{св}}$ – діаметр свердловини) їх повинно бути 3–5 шт. Підривання бойовиків в ініціаторі здійснюється за допомогою ДШ. Однак при встановленні відстані між точками ініціювання не береться до уваги швидкість поширення детонації по ДШ. Це може призвести до вигорання ВР навколо ДШ, оскільки швидкість детонації по ВР менша за швидкість детонації по ДШ.

У праці [8] пропонується до використання багатоточковий ініціатор [8], в якому як точки ініціювання можуть застосовуватися проміжні детонатори – тротиліві шашки Т-400Г або патрони амоніту № 6ЖВ. Проміжні детонатори ініціюються подвійною ниткою детонувального шнура ДШЭ-12. Ініціатор розміщений по осі свердловинного заряду. Відстань між точками ініціювання рекомендується приймати з умови, що детонаційна хвиля, яка поширюється від верхнього бойовика, не поглинає детонаційну хвилю, яка поширюється від нижнього бойовика. Таким чином, детонаційна хвиля бойовика, розташованого нижче, ініціює ВР, розміщену навколо нього, і встигає досягти стінок свердловини. З урахуванням цього відстань між точками ініціювання

$$l = \frac{D_{\text{ДШ}}}{D_{\text{ДШ}} - D_{\text{ВР}}} d_{\text{св}}, \quad (1)$$

де $D_{\text{ДШ}}$ і $D_{\text{ВР}}$ – швидкість поширення детонаційної хвилі по ДШ і ВР, м/с; $d_{\text{св}}$ – діаметр свердловини, м.

Відстань між бойовиками, розрахована за формулою (1), виключає можливість вигорання ВР по довжині свердловинного заряду, оскільки при цьому враховується швидкість поширення детонаційної хвилі по ДШ і ВР. Однак такий критерій встановлення відстані між бойовиками не може вважатися достатньо обґрунтованим, оскільки поглинання детонаційної хвилі, що поширюється від нижнього бойовика, детонаційною хвилею, що поширюється від верхнього бойовика, не є тим фактором, який визначає ефективність дії вибуху свердловинного заряду при застосуванні багатоточкового ініціатора.

Дослідженнями встановлено, що ефективність дії вибуху визначається тиском на фронті ударної хвилі та імпульсом, який діє на стінки свердловини [11]. Припустимо, що сумарний імпульс ударної хвилі від багатоточкового ініціатора по довжині свердловини залежить від відстані між точками ініціювання. Тому для встановлення оптимальної відстані між бойовиками визначимо сумарний імпульс ударної хвилі, яка діє від точкових детонаторів багатоточкового ініціатора, розміщених на певній відстані H один від одного, і

порівняємо його з імпульсом від точкового та лінійного ініціювання на цій же відстані.

Розглянемо випадок ініціювання двох точкових детонаторів 1 і 2 (рис. 1). Після їх ініціювання від першого, а потім другого детонатора починають поширюватися сферичні ударні хвилі по вибуховій речовині. До моменту їх зустрічі сферична хвиля від першого детонатора проходить відстань h_1 , а від другого – h_2 . Тоді час зустрічі ударних хвиль детонаторів

$$t = \frac{h_1}{D} \quad (2)$$

або

$$t = \frac{H}{c} + \frac{h_2}{D}, \quad (3)$$

де D – швидкість поширення детонаційної хвилі по ВР, м/с; c – швидкість детонації по ДШ, м/с; H – відстань між точковими детонаторами, м.

Розв'язуючи спільно рівняння (2) і (3) і враховуючи, що $H = h_1 + h_2$, отримуємо:

$$h_1 = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{D}{c}\right); \quad h_2 = \frac{H}{2} \left(1 - \frac{D}{c}\right). \quad (4)$$

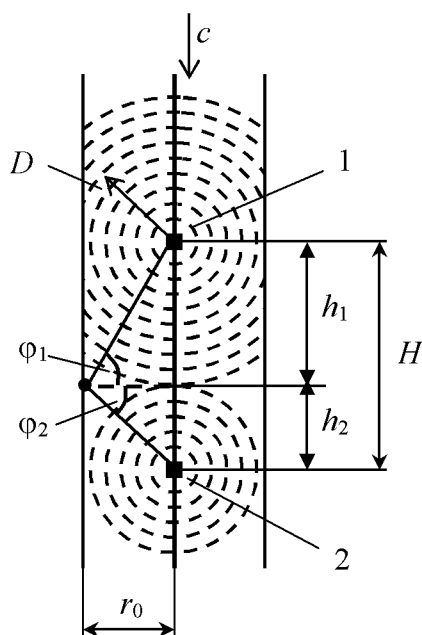


Рис. 1. Схема до розрахунку відстані між точками ініціювання

Визначимо сумарний імпульс ударних хвиль від точкових детонаторів 1 і 2, які досягли стінок свердловини на відрізку H . Згідно з [11] імпульс ударної хвилі, яка падає на перепону під кутом φ ,

$$i_\varphi = i_n (\cos^2 \varphi + \beta \sin^2 \varphi), \quad (5)$$

де i_n – питомий імпульс при $\varphi = 0$; β – параметр, який залежить від властивостей продуктів детонації (показника ізоентропи γ).

Оскільки маємо осьову симетрію, то сумарний імпульс визначиться інтегруванням виразу (5) тільки по h . У цьому випадку

$$I_1 = \int_0^{h_1} i_{\varphi_1} dh + \int_0^{h_2} i_{\varphi_2} dh, \quad (6)$$

де $i_{\varphi_1}, i_{\varphi_2}$ – імпульси ударної хвилі від детонаторів 1 і 2.

Перейдемо до інтегрування по φ :

$$h = r_0 \operatorname{tg} \varphi; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{h}{r_0}; \quad dh = \frac{r_0}{\cos^2 \varphi} d\varphi, \quad (7)$$

де r_0 – радіус свердловини, м.

Тоді

$$I_1 = i_n r_0 \left(\int_0^{\varphi_1} \left(1 + \beta \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \right) d\varphi + \int_0^{\varphi_2} \left(1 + \beta \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \right) d\varphi \right), \quad (8)$$

де

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{h_1}{r_0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{H}{2r_0} \left(1 + \frac{D}{c} \right) \right); \quad \varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{h_2}{r_0} = \operatorname{arctg} \left(\frac{H}{2r_0} \left(1 - \frac{D}{c} \right) \right). \quad (9)$$

В результаті інтегрування отримаємо

$$I_1 = i_n r_0 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{H}{2r_0} \left(1 + \frac{D}{c} \right) \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{H}{2r_0} \left(1 - \frac{D}{c} \right) \right) + \right. \\ \left. + \beta \left[\frac{1}{\cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{H}{2r_0} \left(1 + \frac{D}{c} \right) \right) \right)} + \frac{1}{\cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{H}{2r_0} \left(1 - \frac{D}{c} \right) \right) \right)} - 2 \right] \right]. \quad (10)$$

При ініціюванні свердловинного заряду точковим ініціатором імпульс ударної хвилі на довжині H визначиться інтегруванням:

$$I_2 = i_n \int_0^H (\cos^2 \varphi + \beta \sin \varphi) dH. \quad (11)$$

Оскільки

$$H = r_0 \operatorname{tg} \varphi; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{H}{r_0}; \quad dH = \frac{r_0}{\cos^2 \varphi} d\varphi, \quad (12)$$

то після переходу на інтегрування по φ і безпосереднього інтегрування (11) отримаємо:

$$I_2 = i_n r_0 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{H}{r_0} \right) + \beta \left(\frac{1}{\cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{H}{r_0} \right) \right)} - 1 \right) \right]. \quad (13)$$

У випадку підривання свердловинного заряду лінійним ініціатором імпульс ударної хвилі, яка падає на стінку свердловини на тому ж відрідку H ,

$$I_3 = i_n \int_0^H (\cos^2 \varphi + \beta \sin \varphi) dH. \quad (14)$$

В цьому випадку кут падіння ударної хвилі на стінки свердловини буде постійним:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{D}{c}. \quad (15)$$

Після інтегрування (14) отримаємо

$$I_2 = i_n \left[\cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{D}{c} \right) + \beta \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{D}{c} \right) \right] H. \quad (16)$$

Для встановлення ефективності багатоточкового ініціювання свердловинного заряду визначимо різницю відносних імпульсів ударних хвиль, які виникають при цих методах ініціювання, в залежності від значень H .

При порівнянні з точковим ініціюванням можна записати:

$$\frac{I_1 - I_2}{i_n} = f(H); \quad (17)$$

при порівнянні з лінійним ініціюванням –

$$\frac{I_1 - I_3}{i_n} = f(H). \quad (18)$$

На рис. 2 наведена залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль від H при багатоточковому та точковому ініціюванні за таких умов підривання: свердловина радіусом $r_0 = 0,125$ м; швидкість поширення детонації по ДШ $c = 6200$ м/с; параметр, який залежить від властивостей продуктів детонації $\beta = 1/16$ [9]; швидкість поширення детонаційної хвилі по ВР приймається від 2500 до 5000 м/с.

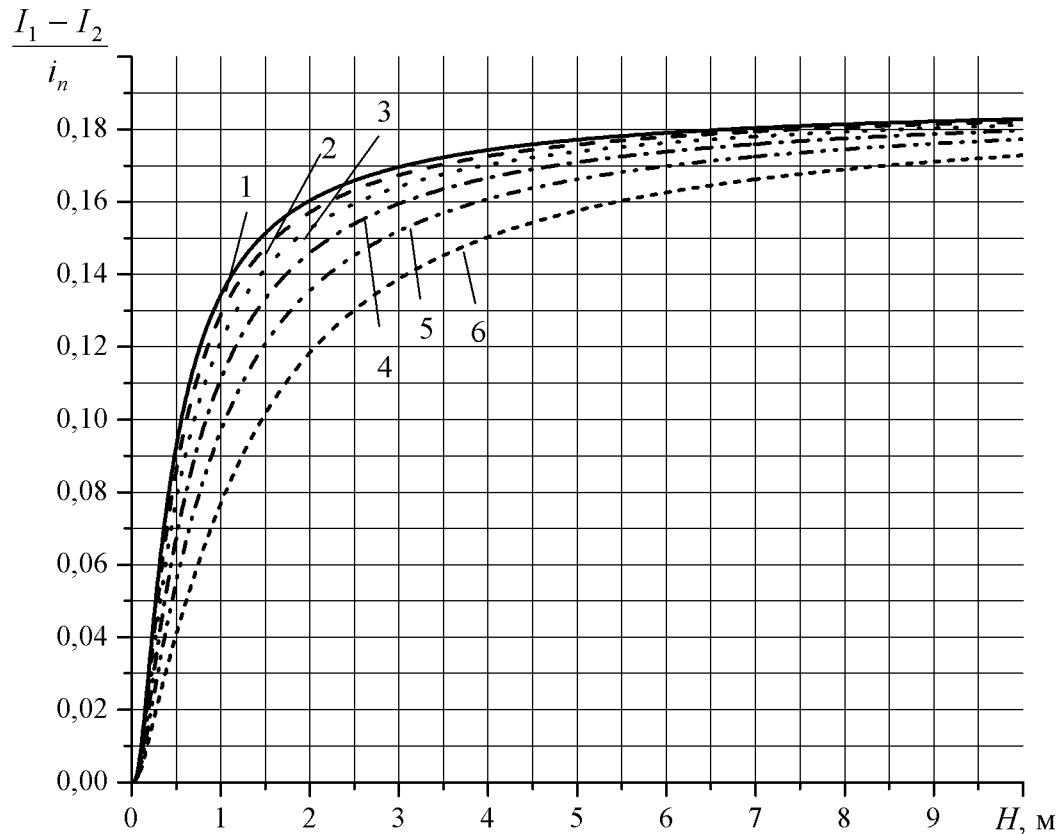


Рис. 2. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та точковому ініціюванні від довжини свердловинного заряду H при різних значеннях швидкості детонації по ВР: 1 – $D = 2500$ м/с; 2 – $D = 3000$ м/с; 3 – $D = 3500$ м/с; 4 – $D = 4000$ м/с; 5 – $D = 4500$ м/с; 6 – $D = 5000$ м/с

Аналіз рис. 2 показує, що при різних значеннях швидкості детонації по ВР імпульс ударної хвилі від багатоточкового ініціатора більший за імпульс ударної хвилі від точкового ініціатора при будь-яких значеннях H . Однак, якщо при відстані між точками ініціювання від 0 до 2 м спостерігається значне зростання різниці відносних імпульсів, то надалі інтенсивність зростання поступово зменшується і потім практично припиняється. Таким чином, при будь-якій відстані між бойовиками багатоточкове ініціювання більш ефективне, ніж точкове за умови виключення вигорання ВР навколо ДШ.

На рис. 3–8 наведено залежності різниці відносних імпульсів ударних хвиль від H при багатоточковому та лінійному ініціюванні за таких же, як і в попередньому випадку, умов підривання для різних конструкцій лінійного ініціатора, які були розроблені і проходили випробування в промислових умовах. Це, насамперед, патронована ВР – Гелекс-650, діаметр патронів 60–90 мм, швидкість детонації $c = 4500$ – 5000 м/с; чотири і більше нитки детонувального шнура ДШЭ-12, швидкість детонації $c = 6200$ м/с; лінійний ініціатор свердловинних зарядів (ЛІС), який складається з подовжених зарядів

флегматизованого гексогену діаметром 11 мм, швидкість детонації $c = 7800$ м/с. Лінійне ініціювання здійснювалося по осі свердловинного заряду ВР.

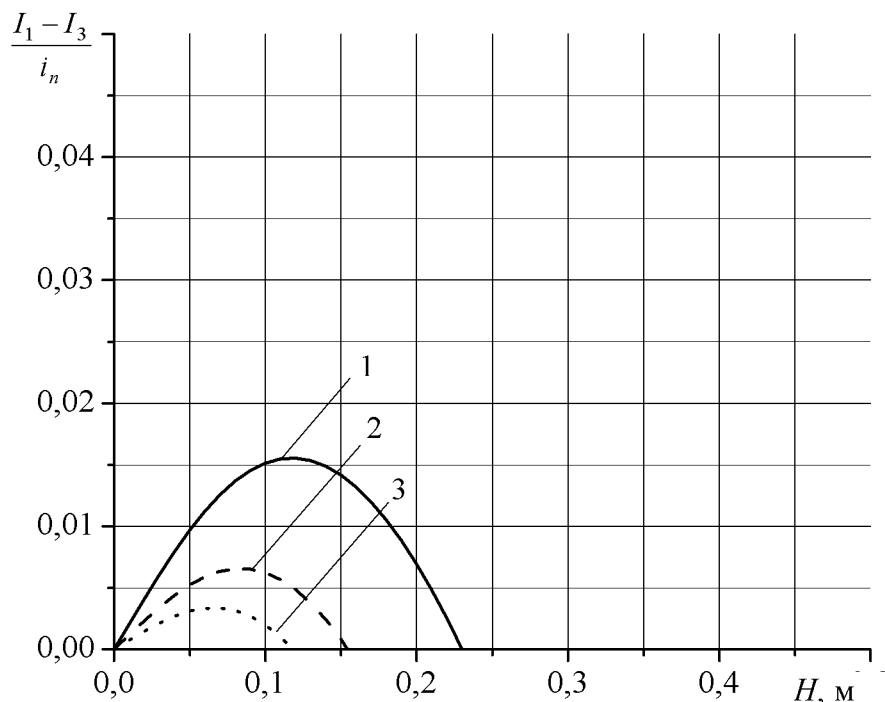


Рис. 3. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та лінійному ініціюванні при швидкості детонації по ВР $D = 2500$ м/с від значень H для різних конструкцій лінійного ініціатора: 1 – Гелекс-650; 2 – ДШЭ-12; 3 – ЛІС

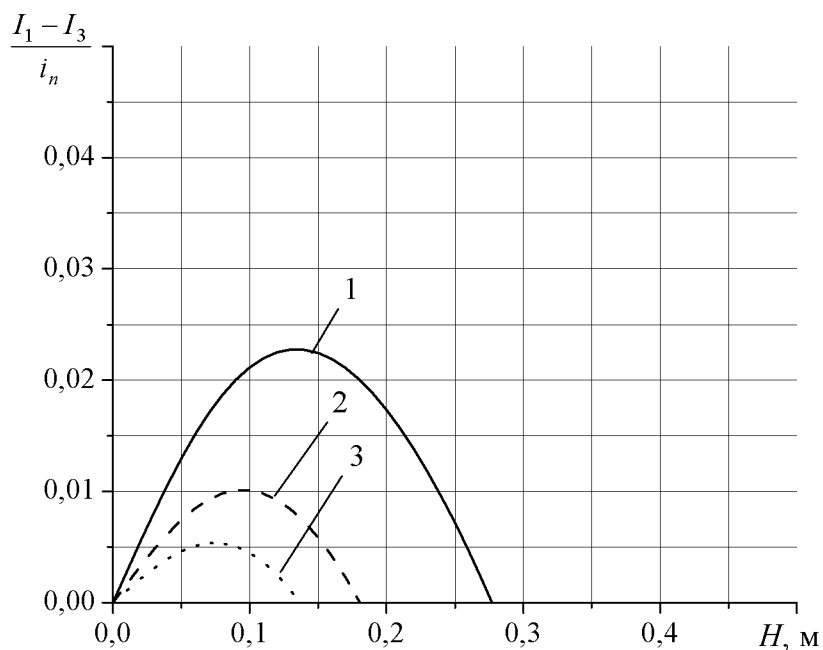


Рис. 4. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та лінійному ініціюванні при швидкості детонації по ВР $D = 3000$ м/с від значень H для різних конструкцій лінійного ініціатора: 1 – Гелекс-650; 2 – ДШЭ-12; 3 – ЛІС

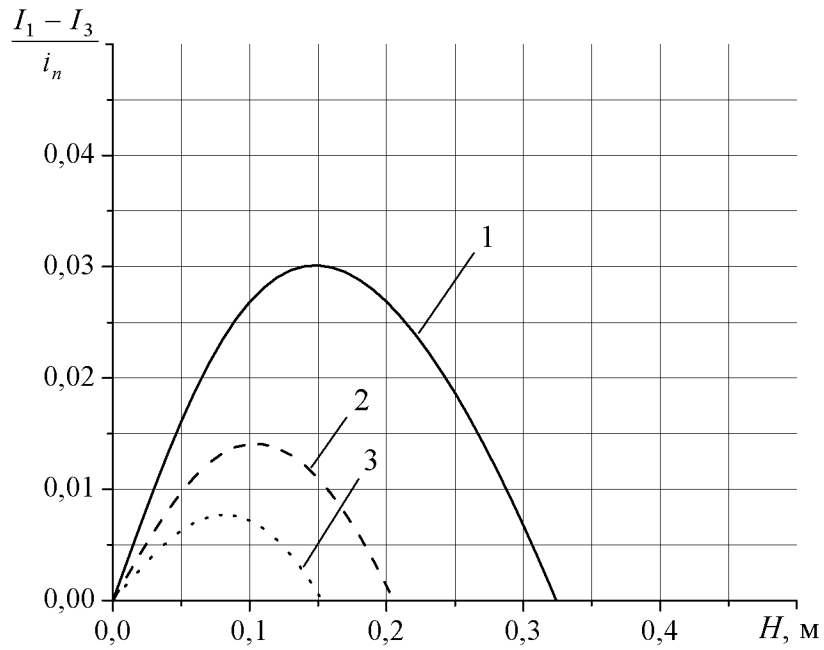


Рис. 5. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та лінійному ініціюванні при швидкості детонації по ВР $D = 3500$ м/с від значень H для різних конструкцій лінійного ініціатора: 1 – Гелекс-650; 2 – ДШЭ-12; 3 – ЛІС

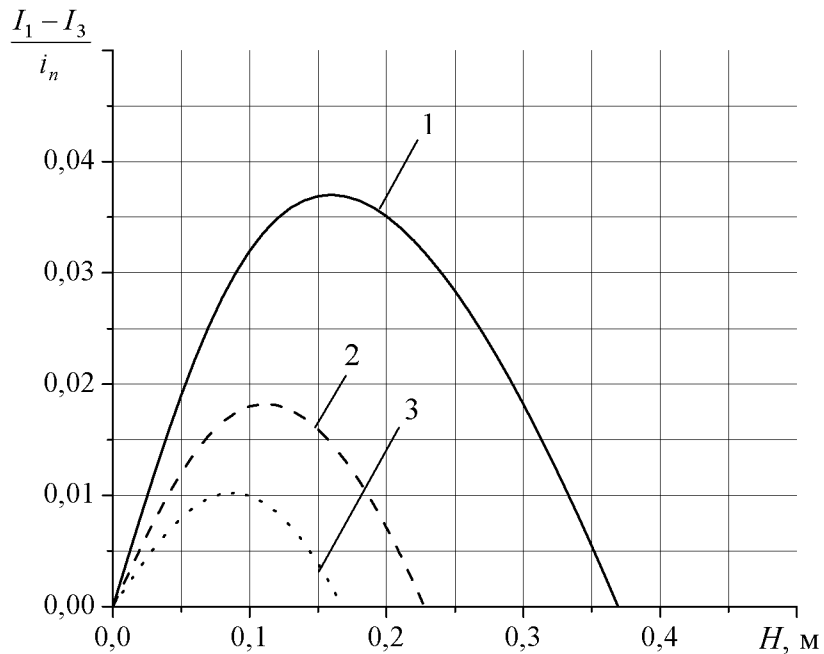


Рис. 6. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та лінійному ініціюванні при швидкості детонації по ВР $D = 4000$ м/с від значень H для різних конструкцій лінійного ініціатора: 1 – Гелекс-650; 2 – ДШЭ-12; 3 – ЛІС

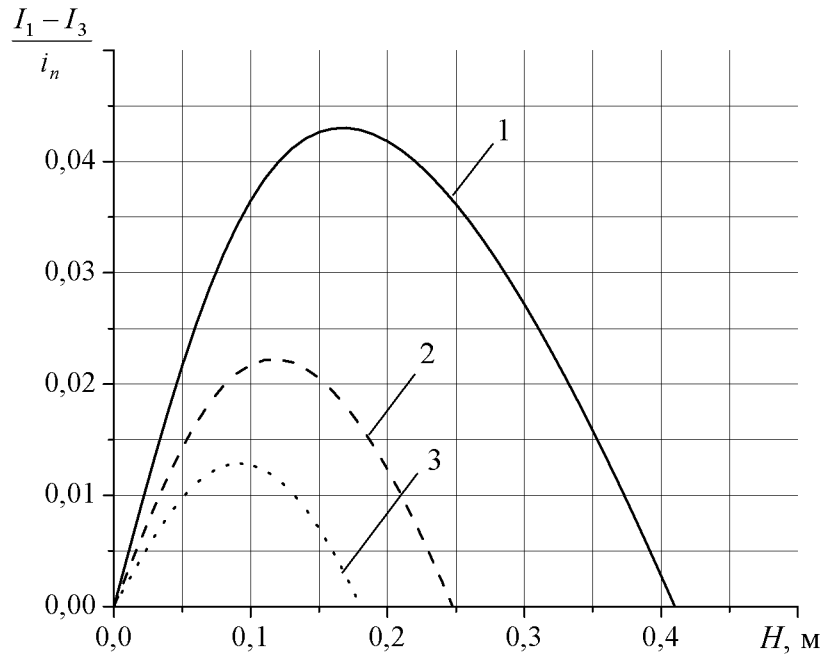


Рис. 7. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та лінійному ініціюванні при швидкості детонації по ВР $D = 4500$ м/с від значень H для різних конструкцій лінійного ініціатора: 1 – Гелекс-650; 2 – ДШЭ-12; 3 – ЛИС

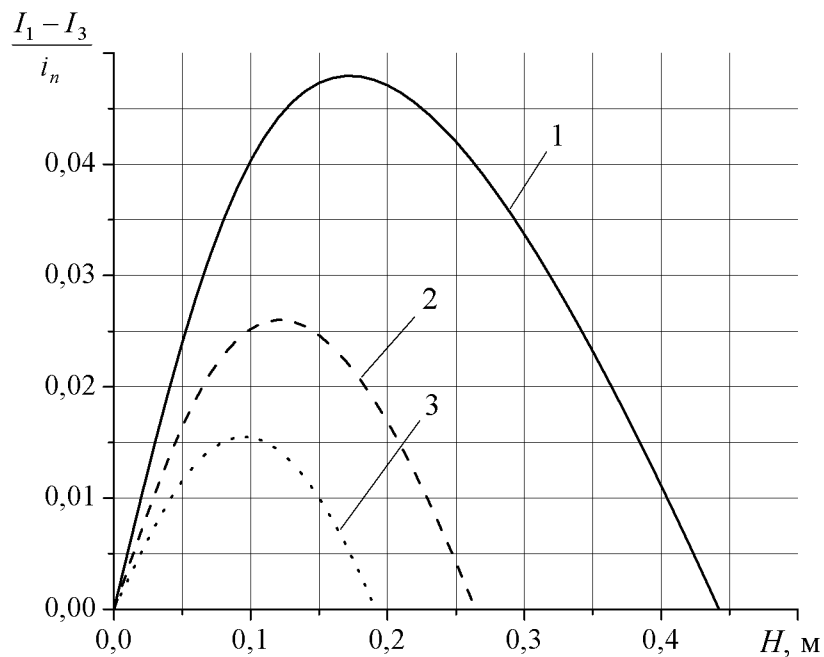


Рис. 8. Залежність різниці відносних імпульсів ударних хвиль при багатоточковому та лінійному ініціюванні при швидкості детонації по ВР $D = 5000$ м/с від значень H для різних конструкцій лінійного ініціатора: 1 – Гелекс-650; 2 – ДШЭ-12; 3 – ЛИС

В результаті аналізу рис. 3–8 встановлено, що чим менша швидкість детонації лінійного ініціатора, тим більша різниця відносних імпульсів при багатоточковому та лінійному ініціюванні при фіксованому значенні H . Отже, ефективність вибуху при підриванні свердловинного заряду багатоточковим ініціатором вища, ніж при підриванні лінійним ініціатором з меншою швидкістю детонації в тому випадку, якщо відстань між бойовиками не перевищує значень, при яких графіки функцій перетинаються з віссю H . При більших значеннях H більш ефективним буде лінійне ініціювання. Зі збільшенням швидкості детонації ВР у свердловинному заряді відстань між бойовиками можна збільшувати, оскільки зростає різниця відносних імпульсів ударних хвиль. Оптимальною відстанню між точками ініціювання в багатоточковому ініціаторі вважається значення H , при якому різниця відносних імпульсів (див. рис. 3–8) є максимальною.

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено, що:
імпульс ударної хвилі на стінки свердловини при багатоточковому ініціюванні залежить від відстані між бойовиками;
при будь-якій відстані між бойовиками багатоточкове ініціювання є більш ефективним порівняно з точковим ініціюванням за умови виключення вигорання ВР навколо ДШ;
ефективність вибуху при підриванні свердловинного заряду багатоточковим ініціатором більша, ніж при підриванні лінійним ініціатором визначених параметрів при дотриманні встановленої відстані між точками ініціювання.

Отримані результати можуть бути базою подальших досліджень механізму підривання свердловинних зарядів ВР багатоточковим ініціатором, зокрема впливу розмірів та форми бойовиків на ефективність передачі енергії ударної хвилі руйнованого масиву гірських порід.

1. *Комплексное исследование действия взрыва в горных породах* / Э. О. Миндели, Н. Ф. Кусов, А. А. Корнеев, Г. И. Марцинкевич. – М.: Недра, 1978. – 253 с.

2. *Воробьев В. Д.* Методы дробления анизотропных пород на основе регулирования параметров импульса взрыва комбинированных зарядов // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – К.: ИГМ НАН Украины, 1995. – 34 с.

3. *Михалюк А. В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 154 с.

4. *Исследование эффективности действия взрыва при многоточечном иницировании удлиненных зарядов* / Сеинов Н. П., Марченко Л. Н., Жариков И. Ф.,

Валиев Б. С., Удачин В. Г. // Взрыв. дело. – М.: Недра. – 1972. – № 71/28. – С. 102–108.

5. *Жариков И. Ф.* Рациональные конструкции зарядов при дроблении горных пород взрывом // Взрыв. дело. – М.: Недра – 1986. – № 89/46. – С. 121–136.

6. *Валиев Б. С.* Исследование и разработка оптимальных параметров эффективного дробления крупноблочных пород Кузбасса при циклично-поточной технологии: Дис. ... канд. техн. наук. – М: ИГД им. А. А. Скочинского. – 1977. – С. 120–122.

7. *Щетинин В. Т.* Повышение эффективности действия взрывов цилиндрических зарядов взрывчатых веществ с многоточечным инициированием: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11. – Кременчуг, 2004. – 191 с.

8. *Фролов О. О.* Встановлення оптимальних параметрів багатоточкового ініціатора // Вісник ЖДТУ. – 2003. – № 2 (26). – Т. 2. Технічні науки. – С. 235–239.

9. *Шапурин А. В., Осадчий И. Ф., Бельчич В. А.* Исследование детонационных характеристик зарядов ВВ при линейном инициировании // Горный журнал. – 1989. – № 11. – С. 26–27.

10. *Бершвили Г. А., Элизбарашвили Т. Ш.* Об эффективности низкочувствительных ВВ при инициировании их боевиками различной конструкции // Взрыв. дело. – М.: Недра. – 1976. – № 76/33. – С. 164–178.

11. *Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др.* Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.