

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПИРАЛЬНОГО ИНИЦИАТОРА ЗАРЯДОВ СМЕСЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. Д. Воробьев, докт. техн. наук, А. М. Масюкевич, канд. физ.-мат. наук (ННИИОТ), В. Л. Демешук, инж. (концерн “Киевподземдорстрой”)

Наведено результати експериментальних досліджень впливу лінійного та спірального ініціаторів на зміну радіуса порожнини, утвореної вибухом зарядів вибухових речовин у ґрунтах.

Одним из основных элементов конструкции заряда взрывчатого вещества (ВВ) является инициатор. От его геометрических параметров, энергетических характеристик и места расположения в заряде зависит полнота реакции химического превращения ВВ в процессе детонации заряда, а, следовательно, и количество переданной энергии взрыва в разрушаемый массив горных пород.

Следует отметить, что за последние годы номенклатура промышленных средств инициирования (СИ) претерпела существенные изменения. Разработаны неэлектрические системы инициирования СИНВ и «Эдилин»; пиротехнические реле РП-8М, РП-Н, РП-Д; капсули-детонаторы КД8-МА и КДБИ-8; защищенные герметичные взрывные патроны ПГН-150 и ПГН-165; нетрадиционные источники инициирующего импульса, основанные на использовании электроимпульсного воздействия и электрохимического взрыва и др. [1, 2]. При этом совершенствование существующих и разработка новых систем инициирования и шашек промежуточных детонаторов, обеспечивающих 100%-ную надежность взрыва, отнесены к одному из стратегических направлений в области взрывных работ [3, 4].

Выбору рационального типа инициатора для соответствующих конструкций зарядов ВВ посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ, в частности [5–12]. Однако в настоящее время, учитывая тенденцию перехода к разработке и внедрению бестротилового ВВ (в основном местного приготовления), требования к безопасности и эффективности взрывных работ значительно повышаются. Жесткие требования предъявляются и к разработке СИ, способных при детонации простейших малочувствительных взрывчатых смесей создавать максимальный инициирующий импульс.

Увеличение доли полезной энергии взрыва на дробление горных пород достигается изменением направления фронта детонационной волны относительно стенки зарядной камеры (скважины, шпура) в процессе

детонации заряда ВВ [11]. Это условие может быть реализовано применением спиральных инициаторов, формируемых из детонирующего шнура (ДШ) или шланговых зарядов ВВ различного диаметра. В работах [13–15] приведены результаты теоретических исследований эффективности этого способа инициирования. Показано, что угол между направлением фронта детонационной волны и стенкой скважины при взрыве зарядов промышленных ВВ с линейным инициатором изменяется в пределах $21...40^\circ$ [15]. При использовании спирального инициатора этот угол может приближаться к 90° , что приводит к многократному импульсному воздействию на породу и, соответственно, к усилению напряженно-деформированного состояния горной породы [13].

Для подтверждения выводов, полученных по результатам теоретических расчетов, были выполнены экспериментальные исследования в полигонных условиях. Цель исследований – установление влияния параметров спирального инициатора в удлиненном цилиндрическом заряде ВВ на изменение радиуса образованной взрывом полости. При этом решались следующие задачи:

экспериментальное обоснование влияния количества витков и шага между ними в спирали инициатора на изменение радиуса полости;

установление зависимостей изменения радиуса полости от количества витков и шага массы заряда ВВ по данным экспериментальных исследований;

разработка практических рекомендаций по эффективному применению спирального инициатора при ведении взрывных работ скважинными зарядами.

Методика эксперимента. Схема экспериментальных исследований при взрывании зарядов ВВ приведена на рис 1.

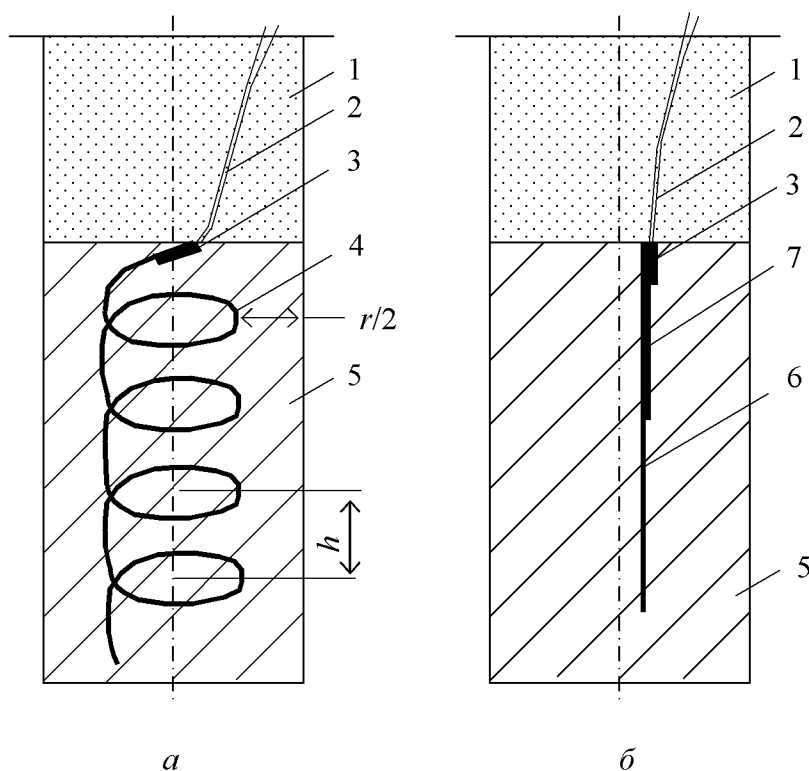


Рис. 1. Конструкции зарядов ВВ с инициаторами: а – спиральным; б – линейным; 1 – забойка; 2 – провода электродетонатора; 3 – электродетонатор; 4 – спиральный инициатор ДШ; 5 – ВВ; 6 – линейный инициатор ДШ; 7 – дополнительный отрезок ДШ к линейному инициатору

Заряды ВВ размещались в шпурах, пробуренных в тяжелых суглинках на площадке ИЭС им. О. Б. Патона НАН Украины (плотность грунта $\rho_r = 1,96 \text{ г/см}^3$, пористость $n = 31,4\%$; влажность $w = 12,5\%$). Параметры заряда ВВ: длина $l_3 = 0,6 \text{ м}$; диаметр $d_3 = 0,06 \text{ м}$; масса $Q_{ВВ} = 1,6 \text{ кг}$; плотность $\rho_{ВВ} = 0,95 \text{ кг/дм}^3$; длина забойки $l_{заб} = 0,03 \text{ м}$; тип ВВ – аммонит 6ЖВ. Использовались две конструкции инициатора из ДШ: спиральный (экспериментальный) и линейный (контрольный). В первом варианте взрывалось расчетное количество зарядов, определяемое закономерностями процессов детонации ВВ с помощью спирали в зависимости от количества витков в ней. Масса линейного и спиральных инициаторов $m_{и}$ принималась одинаковой. Масса линейного инициатора, зависящая от массы спирального, для принятой длины заряда регулировалась дополнительным отрезком ДШ (см. рис. 1, б, поз. 3).

Длина одного витка спирали ДШ

$$l_{1ДШ} = 2\pi\sqrt{r^2 + \frac{1}{4\pi^2}h^2}, \quad (1)$$

где r – радиус витка спирали, м; h – шаг спирали, м.

Длина всей спирали ДШ

$$l_{ДШ} = n_{в}l_{1ДШ} = 2\pi n_{в}\sqrt{r^2 + \frac{1}{4\pi^2}h^2}, \quad (2)$$

где $n_{в}$ – число витков спирали ($n_{в} = l_3/h$).

Условие, при котором отсутствует захлестывание последующих витков спирали ДШ детонационной волной от предыдущих витков, определяется по формуле

$$l_{ДШ}/D_{ДШ} = h/D, \quad (3)$$

где $D_{ДШ}$ и D – соответственно скорость детонации ДШ и ВВ, м/с.

Шаг спирали, при котором отсутствует захлестывание:

$$h = 2\pi r \frac{D}{D_{ДШ}} \left/ \sqrt{1 - \frac{D^2}{D_{ДШ}^2}} \right. . \quad (4)$$

Формула (4) определяет шаг спирали ДШ без учета его толщины. Реальный инициатор обладает толщиной, с учетом которой шаг спирали

$$h_{1,2} = 2 \frac{r_{ДШ} \pm \sqrt{r_{ДШ}^2 + \left(\pi^2 r^2 \frac{D^2}{D_{ДШ}^2} - r_{ДШ}^2 \right) \left(1 - \frac{D^2}{D_{ДШ}^2} \right)}}{1 - \frac{D^2}{D_{ДШ}^2}}, \quad (5)$$

где $r_{ДШ}$ – радиус ДШ, м.

Расчеты показывают, что в формуле (5) величина, получаемая после извлечения корня, всегда больше $r_{ДШ}$, значит, $h_2 < 0$, что не имеет смысла. Поэтому по формуле (5) следует определять только значение h_1 – со знаком “+” перед корнем.

Определим величину шага h_1 спирали ДШ, когда отсутствует захлестывание, при следующих параметрах: радиус спирали ДШ равен половине радиуса заряда, $r_3 = 0,015$ м; радиус инициатора $r_{\text{ДШ}} = 0,0035$ м; $D_{\text{ДШ}} = 7000$ м/с; $D = 4200$ м/с.

Тогда

$$h_1 = 6,365 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$h = h_1 + 2r_{\text{ДШ}} = 0,07065 \text{ м}.$$

Число витков спирали ДШ с таким шагом $n_B = 8,5$.

Диаметр спирального инициатора d_c принимался равным 0,03 м для обеспечения эффекта поперечной детонации ВВ. В каждой серии опытов взрывалось 2...3 заряда. После взрывов одиночных зарядов по двум вариантам (с применением линейного и спирального инициаторов) и четырем сериям, определяемым количеством витков спирали и массой ВВ инициатора, замерялся диаметр образованной взрывом полости $d_{\text{п}}$. По величине $d_{\text{п}}$ рассчитывался радиус полости $r_{\text{п}} = (d_{\text{п}}/2)$, значения которого сравнивались с расчетными, вычисленными по формуле [16]:

$$r_{\text{п}} = \left[\left(0,565 K_{\text{по}} / \eta^{3/2(h_B+h_3)} \right) \right] \sqrt{m_{\text{пр}}},$$

где $K_{\text{по}}$ и η – коэффициенты, определяемые по табличным данным (для тяжелых суглинков приняты: $K_{\text{по}} = 0,460$; $\eta = 1,042$); h_B – глубина воронки, м; h_3 – глубина заложения заряда, м; $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса ВВ.

После взрывов зарядов замерялась величина $d_{\text{п}}$ с шагом по глубине полости 0,05 м. По результатам замеров производилась сравнительная оценка $r_{\text{п}}$ для обоих вариантов инициирования с установлением функциональных зависимостей $r_{\text{п}} = f(n_B, m_3)$, где m_3 – общая масса заряда ВВ с инициатором, кг. Полученные графические зависимости аппроксимировались аналитическими уравнениями с целью определения коэффициентов регрессии, характерных для рассматриваемых параметров зарядов и условий взрывания.

Результаты экспериментов и их анализ. В табл. 1 приведены параметры зарядов и значения $r_{\text{п}}$, на рис. 2 показан характер изменения контуров полости.

Таблица 1. Результаты экспериментов по взрыванию зарядов ВВ с линейным и спиральным инициаторами в тяжелых суглинках

№ серии опытов	Инициатор								
	спиральный					линейный			
	n_B , ШТ	l_c , м	$m_{\text{и}}$, кг	m_3 , кг	$r_{\text{п}}$, м	l_c , м	$m_{\text{и}}$, кг	m_3 , кг	$r_{\text{п}}$, м
1	2	0,63	0,0076	1,608	0,458	0,6	0,0076	1,608	0,417
2	4	0,71	0,0085	1,609	0,486	0,6	0,0085	1,609	0,431
3	6	0,82	0,0099	1,610	0,506	0,6	0,0099	1,610	0,448
4	8	0,96	0,0116	1,611	0,511	0,6	0,0116	1,611	0,465

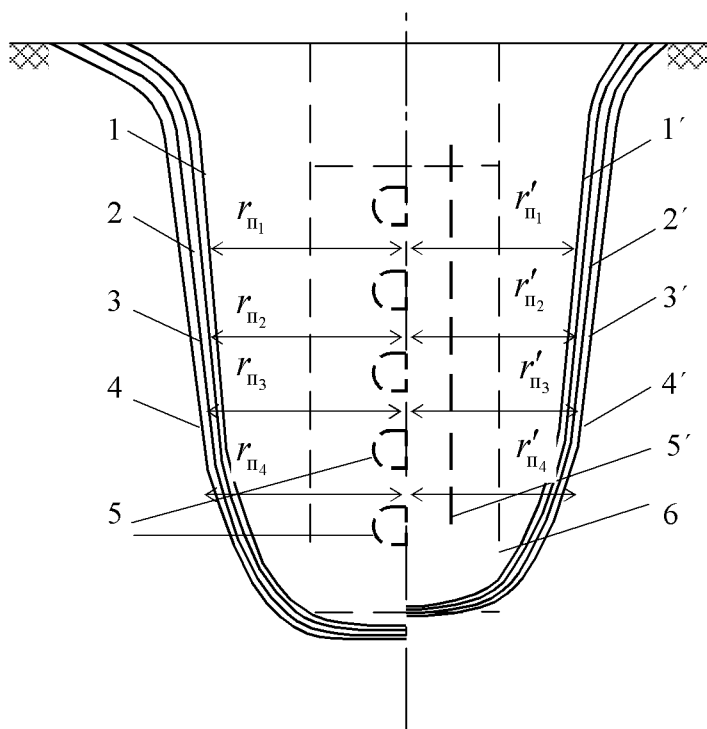


Рис. 2. Совмещенная схема изменения контура полости от взрыва зарядов со спиральным инициатором (1...4): 1 – $n_B = 2$; 2 – $n_B = 4$; 3 – $n_B = 6$; 4 – $n_B = 8$; с линейным инициатором (1'...4'), соответствующим по величине m_H спиральному; $r_{П1} \dots r_{П4}$ и $r'_{П1} \dots r'_{П4}$ – радиусы полости, соответствующие 1...4 и 1'...4'; 5,5' – место расположения спирального и линейного инициаторов; 6 – контур стенки шпура

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что $r_{П}$ при линейном иницировании меньше $r_{П}$ при спиральном иницировании. С увеличением общей массы заряда m_3 от 1,608 до 1,611 кг величина $r_{П}$ при линейном иницировании увеличивается от 0,417 до 0,465 м, то есть в 1,1 раза, что находится в пределах ошибки измерения из-за незначительного приращения m_3 за счет m_H (на 0,048 кг).

При взрывании зарядов с помощью спирального инициатора с увеличением m_3 значения $r_{П}$ увеличиваются от 0,458 м до 0,511 м, то есть так же, как и для линейного иницирования – в 1,1 раза. Однако среднее абсолютное значение $r_{П}$ при спиральном иницировании зарядов на 11% больше, чем при линейном.

По экспериментальным данным построены графические зависимости $r_{П} = f(n_B; m_3)$, приведенные на рис. 3. Зависимость $r_{П} = f(n_B)$ для спирального инициатора (см. рис. 3, зависимость 1) описывается логарифмическим уравнением регрессии вида

$$r_{П} = 0,0398 \ln n_B + 0,4311, \quad (7)$$

а зависимость $r_{П} = f(m_3)$ для линейного инициатора (см. рис. 3, зависимость 2) подчиняется линейному закону и аппроксимируется формулой

$$r_{П} = 16,1 m_3 - 25,473. \quad (8)$$

В обоих случаях иницирования наблюдается тесная корреляционная связь с коэффициентом корреляции, равным 0,99.

Анализ результатов экспериментальных исследований при взрыве зарядов с инициаторами различной геометрии, но одинаковой массы свидетельствует о преимуществе спирального инициатора.

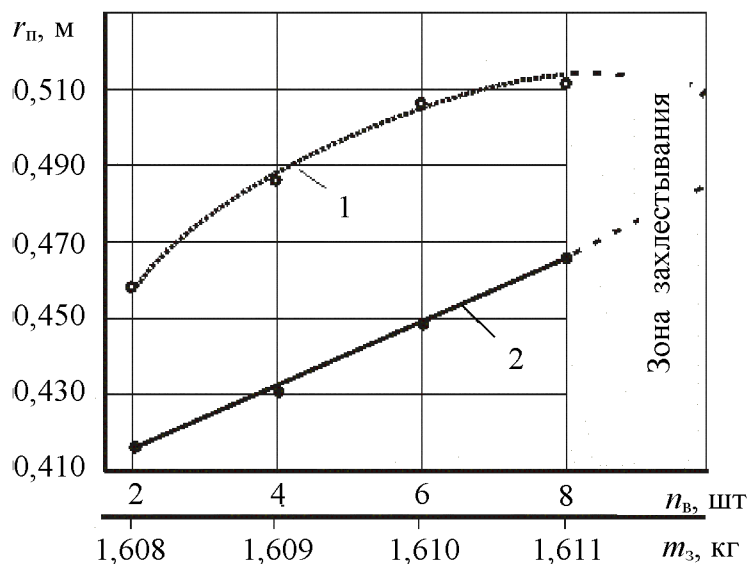


Рис. 3. Изменение радиуса полости r_n при взрыве заряда с помощью спирального инициатора в зависимости от количества витков n_v (1) и при взрыве заряда с помощью линейного инициатора в зависимости от общей массы заряда m_z (2)

Выводы

1. Повышение доли полезной энергии в процессе реакции химического превращения при взрыве заряда ВВ и ее трансформации в разрушаемый массив горных пород достигается применением спирального инициатора, что подтверждает полученные ранее выводы [12, 14, 15, 18].

2. Эффективность спирального инициатора по сравнению с линейным на основе ДШ или шланговых зарядов [7] обеспечивается за счет изменения угла падения фронта детонационной волны на стенку зарядной камеры, приближающегося к 90° .

3. Приращение массы инициатора из ДШ при спиральном и линейном иницировании зарядов ВВ сказывается на увеличении r_n незначительно (на 10...11%).

4. В качестве спирального инициатора могут использоваться ДШ, шланговые заряды собственного приготовления, а также аналогичные снаряды (ШЗ-1, ШЗ-2 диаметром 80...81 мм) в скважинах диаметром более 200 мм. При этом в конструкциях зарядов могут быть применены спиралеобразные элементы, располагаемые в забойке скважин в рассредоточивающих заряд промежутках, в различных местах по высоте заряда и др.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование технологии формирования спиральных инициаторов для обеспечения минимальных затрат времени и экономичности данной операции с учетом конкретных условий производства взрывных работ и применяемых типов ВВ.

1. Воеводка А., Демещук В. Л. Забезпечення оптимального режиму детонації свердловинних зарядів шляхом застосування подовжених ініціаторів // Проблеми охорони праці в Україні: Зб. наук. праць. – К.: ННДІОП. – 2002. – Вип. 5. – С. 41–48.

2. *Егоров Н. С.* Состояние и перспективы разработок промышленных средств инициирования // О состоянии взрывного дела в Российской Федерации. Основные проблемы и пути их решения: Сб. статей Всерос. конф. – М.: МГГУ, 2002. – С. 85–91.

3. *Разработка методов инициирования смесевых взрывчатых веществ* / В. Г. Кравец, А. Воеводка, В. Ч. Таджиева, А. А. Фролов // Промышленные взрывчатые вещества и средства их инициирования: Матер. 1-й Укр. науч. конференции. – Шостка Сумской обл.: ГосНИИХП. – 1995. – Вып. 1. – С. 27–31.

4. *Кутузов Б. Н.* Приоритетные направления технического перевооружения горных предприятий в области взрывных работ // Промышленная безопасность и эффективность новых технологий в горном деле: Сб. матер. Межд. науч.-практ. конф. “Горное дело-2000”. – М.: МГГУ, 2001. – С. 445–455.

5. *Решение Международной конференции “Промышленная безопасность и эффективность новых технологий в горном деле”* // Промышленная безопасность и эффективность новых технологий в горном деле. Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. “Горное дело-2000”. – М.: МГГУ, 2001. – С. 629–634.

6. *Выбор рациональных способов инициирования скважинных зарядов* / Э. И. Ефремов, Б. Н. Кутузов, П. В. Швыдыко и др. // Горный журнал. – 2000. – № 8. – С. 25–28.

7. *О возможности повышения эффективности буровзрывных работ с использованием детонирующего шнура* / А. П. Андриевский, А. М. Авдеев, А. Г. Зилеев, Г. П. Зилеев // Изв. вузов. Горный журнал. – 2004. – № 3. – С. 106–108.

8. *Афанасенков А. Н., Галкин В. В.* Использование утилизируемых взрывчатых материалов для повышения эффективности действия взрыва // ФГВ. – 2001. – Т. 37. – № 2. – С. 131–134.

9. *Ресурсосберегающие технологии взрывного разрушения горных пород* / Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Краснопольский, В. П. Мартыненко. – К.: Техника, 1990. – 149 с.

10. *Барон В. Л., Кантор В. Х.* Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Наука, 1989. – 376 с.

11. *Фролов А. А.* Влияние скорости детонации линейного инициатора на объем воронки дробления // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2000. – Вип. 3. – С. 53–57.

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

13. *Соснин В. А., Смирнов С. П., Сахипов Р. Х.* Оценка работоспособности и полноты взрывчатого превращения эмульсионных взрывчатых веществ // ФГВ. – Новосибирск: СО РАН. – 1998. – № 5. – Т. 34. – С. 118–121.

14. *Воробйов В. Д., Демещук В. Л.* Обґрунтування безпечності висадження свердловинних зарядів в різномісних породах // Проблеми охорони праці в Україні: Зб. наук. праць. – К.: ННДІОП. – 1998. – Вип. 1. – С. 115–121.

15. *Воробьев В. Д., Масюкевич А. М., Демещук В. Л.* Влияние спирального инициатора на параметры детонации зарядов взрывчатых веществ // Вісник

НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2001. – Вип. 5. – С. 40–48.

16. *Демещук В. Л.* Розробка конструкцій свердловинних зарядів вибухових речовин підвищеної безпеки // Проблеми охорони праці в Україні: Зб. наук. праць. – К.: ННДІОП. – 1998. – Вип. 1. – С. 108–114.

17. *Даниленко И. И.* Использование энергии взрыва в строительстве. – К.: Будівельник, 1981. – 168 с.

18. *Фролов О. О.* Оптимізація параметрів системи свердловинних зарядів для руйнування анізотропних масивів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11/ННДІОП. – К., 1998. – 17 с.