

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВЗРЫВА

Развитие угольной отрасли Украины требует дальнейшего совершенствования буровзрывной технологии, на долю которой приходится 54,5% общей протяженности строительства горизонтальных и наклонных горных выработок. На рудниках по добыче железной и урановой руд этот показатель равен, практически, 100%. Постоянно растут объемы БВР и на открытых горных работах, что обусловлено резким возрастанием потребности в щебне для модернизации автомобильных дорог. Эти причины вызывают необходимость увеличения количества изготавливаемых промышленных ВВ. Наряду с этим, в силу ряда независимых от производителей взрывчатых материалов причин (повышения цен на энергоносители и электроэнергию, инфляционных процессов), возрастает конечная цена продукции. Ожидаемого существенного снижения ее стоимости за счет применения при изготовлении тротилсодержащих конверсионных ВВ не произошло, т.к. объем их использования не превышает 1%. Кроме того, одним из ограничивающих факторов, препятствующих их применению, являются экологические нормы, лимитирующие выделение при взрыве ядовитых газов.

Применение менее мощных бестротилового ВВ, обладающих к тому же более низкой детонационной способностью, делает все более актуальной задачу повышения эффективности использования энергии взрыва.

Данная статья продолжает цикл работ, посвященных исследованию влияния шпуровых рефракторов (устройств для искривления/преломления УВ и ПД) на перераспределение энергии взрыва [1].

Целью работы является теоретическое обоснование и экспериментальная проверка формы и состава активных (способных взрывчато разлагаться или детонировать со скоростью меньшей, чем детонация основного заряда ВВ) рефракторов для увеличения энергии взрыва и перераспределения его импульса.

Особенностью расширения ПД промышленных ВВ является постепенное уменьшение показателя политропы от  $n=3$  до  $k=1,2$  по неизвестной до настоящего времени аналитической зависимости. Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович предложили [2] считать ПД газом, у которого  $\gamma = n = 3$  при расширении на начальном участке до давления  $p_* = (2-3) \cdot 10^8$  Па и  $\gamma = k = 1,2$  при расширении ниже указанного давления  $p_*$ . Общая работа, выполненная при этом, составляет только часть общей энергии (теплоты) взрыва  $E$ , потому что  $\eta = 0,6-0,7$ . Полезная работа  $A_{\text{полезн.}}$  расширения ПД, направленная на создание воронки выброса, составляет еще меньшую часть, т.к. для установления в объеме  $V_0$  начального давления  $p_0$  работа

расширения безвозвратно теряется (диссипирует) на границе «ПД-массив». Ее значение определяют по выражению (1):

$$A_{\text{полезн.}} = \frac{p_0 \cdot V_0}{\gamma - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_k} \right)^{\gamma - 1} \right], \quad (1)$$

где  $p_0 = \frac{\rho_{BB} \cdot D_{BB}^2}{8}$  - начальное давление продуктов взрыва, Па;  $\rho_{BB}$  - плотность ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{BB}$  - скорость детонации ВВ, м/с;  $V_0, V_k$  - начальный и конечный объемы ПД, м<sup>3</sup>;  $V_0 = V_{BB} + V_{\text{полости}}$ ;  $V_{BB}$  - объем ВВ, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{полости}}$  - свободный объем, м<sup>3</sup>;  $\gamma = 1,2-3$  - показатель политропы расширения ПД.

Полезная работа расширения начинается с момента установления в начальном объеме  $V_0$  давления  $p_0$  при условии мгновенной детонации. При этом  $\gamma = n = 3$ ,  $E = Q_{BB} \cdot M_{BB}$ . Последняя составляющая полной работы отображает ее часть, совершаемую из состояния  $p_k = p_a$ ,  $V_k = V_{\text{воронки}}$ ,

$\gamma = k = 1,2$ ,  $A_{\text{полезн.}} = \eta \cdot E$ ,  $\eta = \left( \frac{V_0}{V_k} \right)^{\gamma - 1}$  до состояния  $V = \infty$ , которая также не

является полезной.

С позиции управления действием взрыва существенным является отсутствие наложения ограничений на характер пространственной симметрии расширения продуктов взрыва при получении вышеприведенных зависимостей. Это обстоятельство указывает на то, что при ограниченной общей энергии взрыва можно существенно повысить ее концентрацию в требуемых направлениях [3]. Одним из направлений решения этой задачи является использование активных рефракторов, которые усиливают фугасное действие взрыва за счет выделения дополнительной энергии по сравнению с использованием заряда обычной конструкции.

Теплота взрыва заряда ВВ с активным рефрактором определяется выражением (2):

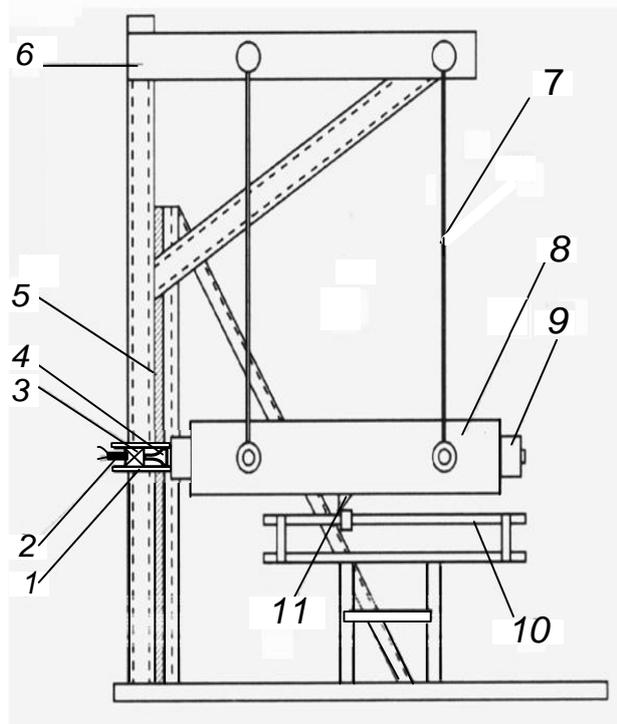
$$Q_2 = Q_{BB} \cdot M_{BB} + q_{\text{реф}} \cdot M_{\text{реф}}, \quad (2)$$

где  $Q_{BB}$  - удельная теплота взрыва ВВ, кДж/кг;  $M_{BB}, M_{\text{реф}}$  - соответственно массы зарядов ВВ и рефрактора, кг;  $q_{\text{реф}}$  - удельная теплота взрыва рефрактора, кДж/кг.

Выражение (2) показывает, что наличие активного рефрактора увеличивает теплоту (энергию) взрыва.

Главный компонент активного рефрактора – аммиачная селитра (АС). Однако, т.к. она имеет положительный кислородный баланс и большой критический диаметр, ее нельзя в чистом виде использовать в шпуровых зарядах. Чтобы избежать отказов, в состав активного рефрактора добавлены горючие компоненты, снижающие критический диаметр до требуемого значения [4]. Замена при изготовлении рефракторов тротила (гексогена) на

АС увеличивает продолжительность воздействия продуктов взрыва на породный массив, сокращает количество выделяемых вредных газов и снижает стоимость изделий [5].



- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 – деревянный стержень; | 7 – подвеска;             |
| 2 – электродетонатор;    | 8 – маятник;              |
| 3 – заряд ВВ;            | 9 – носок;                |
| 4 – рефрактор;           | 10 – линейка с делениями; |
| 5 – броневой лист;       | 11 – водило               |
| 6 – кронштейн;           |                           |

Рис.1. Испытательный стенд для определения осевого импульса взрыва

Испытания активных рефракторов проведены на баллистическом маятнике (рис.1). Анализ результатов испытаний показал, что наличие в шпуровом заряде рефрактора, содержащего смесь окислителя и горючего, уменьшает осевой импульс взрыва, переданный телу маятника. Кроме того, существенное значение имеет также и форма рефрактора. Наименьший осевой импульс был получен при использовании активного рефрактора для врубовых и оконтуривающих шпуров. При этом осевое действие взрыва по сравнению с зарядом без рефрактора уменьшилось на 51%. При применении инертных рефракторов этот показатель составил лишь 26,4% [1]. Большая эффективность действия активного рефрактора достигнута за счет наличия в его составе аммиачной селитры с горючими добавками, которые детонируют или взрывчато разлагаются со скоростью, меньшей, чем заряд ВВ.

Это дает дополнительную возможность управлять импульсом взрыва за счет перераспределения его из осевого направления в радиальное при столкновении потоков ПД, которые движутся с различными скоростями.

При определении радиального импульса взрыва заряд располагали вертикально по отношению к носку баллистического маятника. Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что применение рефрактора из активного материала увеличивает радиальный импульс взрыва на 65% по сравнению с конструкцией без рефрактора и на 25,7% по сравнению с конструкцией с инертным рефрактором.

Для измерения КПД энергии взрыва используется воронка выброса, объем которой вычисляется согласно выражению (3).

$$V_{\text{воронки}} = \frac{\pi \cdot r_e^2 \cdot W}{3}. \quad (3)$$

Показателем действия взрыва  $n_e$  служит отношение радиуса воронки выброса

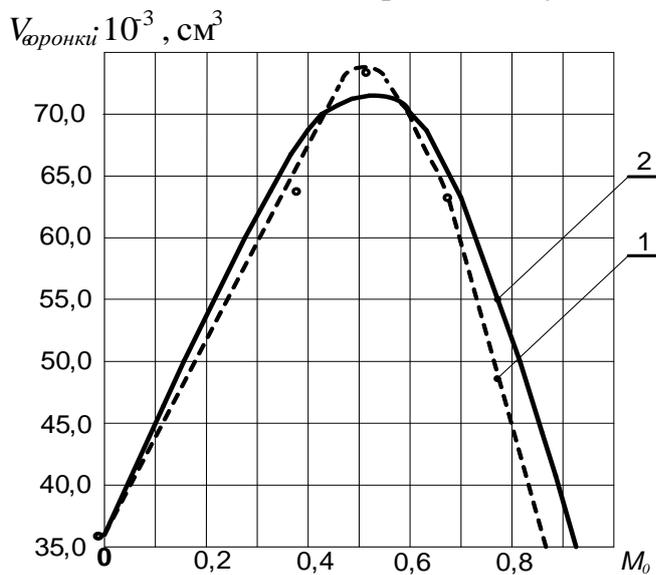


Рис.2. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости объема воронки выброса от соотношения масс активного рефрактора и заряда ВВ

взрыве заряда ВВ без рефрактора,  $36064,6 \text{ см}^3$ ) рассчитывается согласно выражению (4):

$$\frac{V_{\text{воронки}}}{V_0} = 6,25 \cdot M_o^3 + 3,36 \cdot M_o^2 + 2,05 \cdot M_o + 1,0. \quad (4)$$

Анализ зависимости показывает, что воронка выброса имеет максимальный объем при соотношении масс активного рефрактора и заряда ВВ, равном 0,5. Использование заряда массой 100 г с активным рефрактором массой 50 г обеспечило его полную детонацию, что сопровождалось выделением дополнительной энергии и газов взрыва, а также увеличением его фугасного действия. Дальнейшее увеличение массы рефрактора при постоянной массе ВВ уменьшило объем воронки выброса в связи с неполной детонацией рефрактора. При этом часть энергии взрыва была затрачена на его разрушение.

Предложенный состав активного рефрактора из материалов, способных к взрывчатому разложению со скоростью более низкой, чем детонация заряда основного ВВ, позволяет управлять импульсом взрыва. Это происходит за счет его перераспределения из осевого направления в радиальное при столкновении струй ПД, движущихся с различными скоростями. При взаимодействии детонационной волны ВВ с материалом активного рефрактора, в нем возбуждается экзотермическая химическая реакция окисления горючего окислителя, в результате которой выделяется тепловая

$r_e$  к линии наименьшего сопротивления  $W$ . Экспериментальные исследования влияния рефракторов на фугасное действие взрыва были проведены в песчаной подушке лаборатории БВР ДонНТУ. По результатам экспериментов получена зависимость объема воронки выброса от соотношения  $M_o$  масс активного рефрактора и заряда ВВ (рис.2),

$$\text{где } M_o = \frac{M_{\text{реф}}}{M_{\text{реф}} + M_{\text{ВВ}}}.$$

Зависимость нормированного значения (отношения объема воронки выброса  $V_{\text{воронки}}$  к  $V_0$  –

объему воронки выброса при

энергия. ПД отражаются от рефрактора, и в них возникает волна разряжения, которая начинает двигаться в противоположную сторону относительно детонационной волны. Поэтому продукты взрыва ВВ и продукты горения активного рефрактора начинают движение в сторону волны разряжения, т.е. к устью шпура (скважины). Здесь они сталкиваются с забойкой, снова отражаются и начинают движение в сторону активного рефрактора. При взаимодействии с активным рефрактором, они обогащаются продуктами его горения и, отражаясь, опять двигаются в сторону забойки. Процесс повторяется несколько раз, пока не произойдет разрушение массива и выброс забоечного материала. В результате такого растянутого действия продуктов взрыва ВВ на массив интенсивность его разрушения возрастает, а удельный расход ВВ уменьшается.

Таким образом, результаты экспериментов наглядно подтвердили возможность управления действием взрыва заряда ВВ геометрией и химическим составом рефрактора. Активный рефрактор, изготовленный из смеси АС и горючей компоненты, массой, равной 0,5 массы заряда, снижает осевой импульс взрыва на 51%, увеличивает радиальный на 65% и усиливает фугасное действие взрыва на 105%.

### Список литературы

1. Шкуматов А.Н. Асимметричное перераспределение импульса взрыва // Взрывное дело. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – Вып. №99/56. – С. 40-46.
2. Ландау Л.Д., Станюкович К.П. Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ // ДАН. – 1945. - № 46. – С. 399.
3. Лебедев Д.М., Лебедев М.А. К вопросу оптимизации работы расширения продуктов взрыва // VI Забабахинские научные чтения. Тез. докл. – Снежинск, 2001. - <http://www.vniitf.ru/events/ZN2001/4.pdf>.
4. Пат.23644 Україна МПК<sup>6</sup> F42D 1/08 Пристрій для запирання продуктів вибуху шпурового або свердловинного заряду / С.О. Калякін, О.М. Шкуматов (Україна) – № и 200610633; замовл.9.10.06; надрук. 11.06.07.–Бюл. № 8, 2007 р.
5. Назаров З.С., Тухташев А.Б., Назарова С.Э. Выбор оптимального состава тормозящее-активной забойки из ВВ простейшего состава // Горный вестник Узбекистана, 2005. - №3 (22). – С. 62-64.