

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КАПСУЛЫ С ИНГИБИТОРОМ В ЗАБОЙКЕ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ**

*А. Я. Бережецкий, инж. (Госгорпромнадзор Украины)*

*Виконано теоретичні розрахунки по обтрунтуванню умови руйнування під дією вибухового навантаження капсули з інгібітором у вигляді гашеного вапна, розміщеного в свердловині між зарядом і забивкою. Результати розрахунків можуть бути використані при виборі конструкцій свердловинних зарядів з метою підвищення якості вибухового дроблення гірських порід і локалізації пилгазових викидів у атмосферу робочої зони гірничовидобувних підприємств.*

Горнодобывающая промышленность Украины характеризуется наличием крупнейших в мире карьеров по добыче железных руд и большим количеством карьеров по добыче нерудных строительных материалов. При этом на всех карьерах одним из основных технологических процессов являются взрывные работы, которые значительно увеличивают техногенную нагрузку территории Украины, особенно в промышленно развитых регионах (Донбасс, Кривбасс, Приднепровье). Образующееся при взрывных работах пылегазовое облако может подниматься на высоту до 1300...1600 м, его объем может достигать 15...20 млн м<sup>3</sup>, а концентрация пыли в облаке – 680...4250 мг/м<sup>3</sup>. Пылегазовое облако, образующееся при взрыве, распространяется на расстояние 10...15 км от карьера, концентрация пыли в облаке может достигать 1200...2800 ПДК на расстоянии 1 км от карьера и 90...100 ПДК на расстоянии до 10 км [1]. Удельное пылеобразование, в зависимости от технологических условий и параметров взрыва, колеблется в пределах 0,043...0,254 кг на 1 кг взорванного взрывчатого вещества (ВВ). В окружающую атмосферу ежегодно выбрасывается около 10...13 млрд л СО и 1,0...1,5 млрд л NO<sub>x</sub> [2]. Таким образом, горнодобывающие предприятия, являясь потенциально опасными объектами, обуславливают высокую вероятность профессиональных заболеваний, несчастных случаев и аварий. Это подтверждают данные о профессиональных заболеваниях в системе Минтопэнерго Украины. Наибольшее количество профессиональных заболеваний, связанных с вдыханием пыли, было зарегистрировано в период 1990...1996 гг. при подземной разработке полезных ископаемых. Так, в 1996 г. на долю заболеваний пневмокониозом приходилось 28,3%, хроническим бронхитом – 26,8%, то есть 55,1% от всей патологии по стране. Первое место по этим заболеваниям занимает угольная промышленность (антросиликоз – 80%, силикоз – 9,6% и антропокоз – 4,9%). От болезней чаще всего страдают работники таких профессий: бурильщики, взрывники, проходчики, забойщики и др.

На буровзрывные работы приходится более 35% общего объема загрязнений [3]. Количество ядовитых газов в пылегазовом облаке при

массовом взрыве определяет его токсикологическую опасность и зависит от применяемых типов ВВ и минералогического состава горных пород. Создание и внедрение в последние годы новых ВВ местного приготовления и переход горных предприятий на их использование с применением средств механизации технологических операций значительно усложнило технологию взрывных работ и повысило требования, связанные с охраной здоровья рабочего персонала и окружающей среды. Однако, несмотря на постоянное совершенствование ВВ в направлении повышения их экологической безопасности, все еще имеют место профзаболевания и травматизм, связанные с применением ВВ. Это объясняется:

разработкой и применением новых машин и механизмов для приготовления ВВ на местах производства взрывных работ;

нарушением ЕПБ при взрывных работах и использованием некачественных ВВ местного приготовления;

отсутствием структурных технологических схем производства взрывных работ (от изготовителя ВВ до карьера) и критериев оценки их конкурентоспособности [4];

недостаточным контролем за соблюдением ЕПБ при взрывных работах.

Проблему снижения пылегазовых выбросов следует решать, в первую очередь, за счет уменьшения размеров зоны пластических деформаций путем применения низкобризантных ВВ (игданит, Д-5, КС-1, ПВС-1У и др.) и сокращения площади контакта ВВ с горной породой (конструкции зарядов). Однако в силу значительной обводненности массивов горных пород использование этих ВВ ограничивается, что определяет необходимость поиска и разработки других средств и методов пылеподавления при взрывах.

В работах [5, 6] приведены сведения об эффективности использования специального устройства управления энергией взрыва (УУЭВ), предназначенного для запираания газообразных продуктов взрыва в скважине. Эффект запираания продуктов детонации в скважине при взрывах подтвержден зарубежной практикой [7, 8] и экспериментальными исследованиями действия УУЭВ в условиях карьеров Украины [9]. В последнем случае [5, 6, 9] УУЭВ представляло собой капсулу с ингибитором (гашеной известью) в полиэтиленовой оболочке массой 10 кг, которая располагалась между верхним торцом заряда ВВ и забойкой из сыпучего материала (отсев, щебень). Анализ экспериментальных взрывов одиночных и групповых зарядов с УУЭВ в забойке скважины показал, что по сравнению с взрывом зарядов в скважинах с обычной забойкой объем пылегазового облака уменьшается в 2,8 раза, скорость вылета забойки из скважины – в 1,8 раза, величина подъема облака – в 1,6 раза. Длительность вылета забойки с УУЭВ в интервале изменения высоты подъема от 1,5 до 4,4 м возрастает от 0,12 до 0,48 с [9].

Применение УУЭВ в забойке скважинных зарядов позволяет уменьшить расход ВВ на 20...50 кг на один заряд без ухудшения качества дробления пород. В результате уменьшается объем вредных газов взрыва и масса пылевых частиц за счет сокращения размера зоны пластических деформаций на контакте

заряд–порода. Наличие в УУЭВ гашеной извести приводит к поглощению углекислого газа оксидом кальция с образованием карбоната кальция, частицы которого являются центрами конденсации паров воды. Такая реакция взаимодействия газообразных продуктов взрыва с пылевыми частицами обеспечивает эффект быстрого пылеподавления в облаке взрыва. Этот эффект может быть усилен, если вместо обычной забойки из сыпучего материала применить водяную забойку. Водяная забойка над УУЭВ формируется в полиэтиленовом рукаве. Совместный эффект запираания устья скважины и нейтрализации газов взрыва достигается в том случае, если УУЭВ разрушается под действием динамических нагрузок, превышающих предел прочности этого устройства. Если это условие при взрыве не достигается, то произойдет выброс УУЭВ из скважины вместе с забойкой.

Для исключения этого отрицательного явления и проектирования рациональных конструкций скважинных зарядов ВВ необходимо теоретическое обоснование механизма разрушения УУЭВ с ингибитором, которое в настоящее время отсутствует.

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование механизма разрушения УУЭВ с гашеной известью при взаимодействии его с сыпучим материалом забойки для локализации пылегазовых выбросов в атмосферу. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

выбор граничных условий для модели при взрыве заряда ВВ с расположением между верхним его торцом и забойкой из сыпучего материала капсулы с ингибитором;

выбор схемы физической модели «скважинный заряд с УУЭВ в забойке из сыпучего материала» для изучения волнового процесса при детонации ВВ;

решение задачи о движении под действием взрыва сфероидальной капсулы с ингибитором как жесткого целого;

исследование рефракционных волн, переходящих через капсулу, за счет которых при определенных условиях происходит ее разрушение;

определение рациональных параметров забойки с УУЭВ.

Для описания динамики волнового процесса при взрыве заряда ВВ с забойкой, вмещающей капсулу с ингибитором как жесткое целое, приняты следующие граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} U_r^0 + U_r^* &= V \cos \theta = VP(\cos \theta); \\ U_\theta^0 + U_\theta^* &= V \sin \theta = V \left[ dP \frac{(\cos \theta)}{d\theta} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $V$  – общая скорость перемещения капсулы в направлении падающей волны  $x_3$ ;  $U_r^0, U_r^*$  – составляющие скорости перемещения в падающей волне;  $U_\theta^0, U_\theta^*$  – составляющие скорости перемещения в поле отраженных волн.

Поступательная скорость  $V$  капсулы с ингибитором (как жесткого целого) определяется из известного уравнения Ньютона:

$$mV = \iint (\sigma_{rr} \cos\theta - \sigma_{r\theta} \sin\theta) R^2 \sin\theta dr, \quad (2)$$

где  $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{и}}$  – масса капсулы (сферы);  $\rho_{\text{и}}$  – плотность ингибитора (капсулы).

Интеграл (2) берется по половине поверхности капсулы радиуса  $a$  и представляет силу, действующую на нее со стороны забойки согласно схеме физической модели (рис. 1).

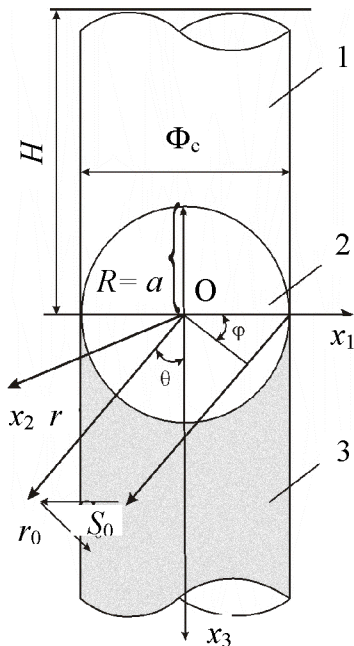


Рис. 1. Схема физической модели к расчету параметров состояния и движения забойки с ЗУЭВ при взрыве заряда в скважине: 1 – забойка; 2 – капсула (ЗУЭВ); 3 – ВВ;  $H$  – длина забойки

Потенциал падающей волны, которая генерируется взрывом удлиненного цилиндрического заряда, можно представить в виде

$$\Phi^0 = A e^{i(\alpha x_3 - \omega t)}, \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда импульса давления от действия взрыва заряда;  $\alpha$  – волновое число ( $\alpha = \omega/c_1$ , где  $\omega$  – круговая частота,  $c_1$  – скорость распространения волн расширения в массиве горных пород).

Круговую частоту  $\omega$  и амплитуду  $A$  для конкретного ВВ можно рассчитать согласно рис. 2, где импульс взрыва  $\int_0^{\tau} P(t) dt$  определяется теоретически или экспериментально, исходя из параметров заряда ВВ.

Поскольку капсула имеет ось вращения, которая совпадает с осью заряда ВВ, то потенциал отраженной волны  $\Phi^*$  можно определить из решения для осесимметричной задачи (ось симметрии – ось скважины и капсулы,  $Ox_3$ ), для которой оператор Лапласа в волновых уравнениях имеет вид

$$\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + 2 \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} + \text{ctg}\theta \frac{1}{r^2} \frac{d}{d\theta}. \quad (4)$$

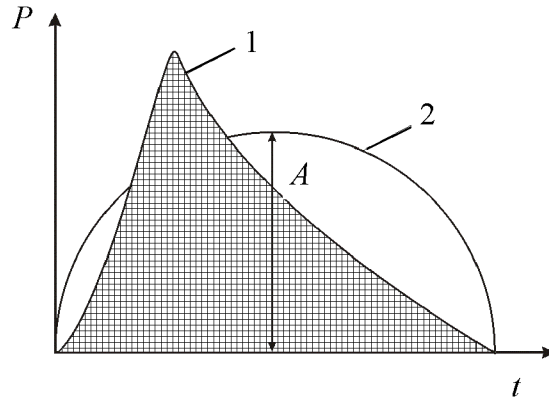


Рис. 1. Схема к определению  $\omega$  и  $A$ :  $1 - \int_0^{\tau} P(t) dt$ ;  $2 - A \int_0^{\tau} \sin \omega t dt$ ;  $P$  – давление в скважине

Падающая плоская волна от взрыва заряда ВВ может быть представлена в сферических координатах в виде ряда:

$$\Phi^0 = A \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) i^n j_n(\alpha r) P_n(\cos \theta), \quad (5)$$

где  $j_n(\alpha r)$  – сферические функции Бесселя;  $P_n(\cos \theta)$  – полиномы Лежандра (множитель  $e^{-i\omega t}$  опущен).

Общее решение волновых уравнений, удовлетворяющее условиям излучения, может быть записано в виде

$$\Phi^* = \sum_{n=0}^{\infty} A_n h_n(\alpha r) P_n(\cos \theta); \quad \Psi^* = \sum_{n=0}^{\infty} B_n h_n(\beta r) P_n(\cos \theta), \quad (6)$$

где  $h_n(\alpha)$  – сферические функции Ханкеля 1-го ряда;  $A_n, B_n$  – неопределенные постоянные;  $\beta$  – волновое число ( $\beta = \omega/c_2$ , где  $c_2$  – скорость распространения волн сдвига).

В таком случае входящие в уравнение (2) выражения для  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{r\theta}$  имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= 2\mu^{-2} \sum_0^{\infty} (-A\varepsilon_3 + A\varepsilon_{31} + A\varepsilon_{32}) P_n; \\ \sigma_{r\theta} &= 2\mu^{-2} \sum_0^{\infty} (-A\varepsilon_4 + A\varepsilon_{41} + A\varepsilon_{42}) \frac{dP_n}{d\theta}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $P_n = P_n(\cos \theta)$ ;

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= -i^n (2n+1) \left[ \left( n^2 - n - \frac{\alpha^2 r^2}{2} \right) j_n(\alpha r) + 2\alpha r j_{n+1}(\alpha r) \right]; \\ \varepsilon_4 &= -i^n (2n+1) \left[ (n-1) j_n(\alpha r) + 2\alpha r j_{n+1}(\alpha r) \right]; \\ \varepsilon_{31} &= \left( n^2 - n - \frac{\alpha^2 r^2}{2} \right) h_n(\alpha r) + 2\alpha r h_{n+1}(\alpha r); \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{32} = n(2n+1) \left[ (n-1)h_n(\alpha r) + 2\alpha r h_{n+1}(\alpha r) \right];$$

$$\varepsilon_{42} = - \left( n^2 - 1 - \frac{\alpha^2 r^2}{2} \right) \left[ h_n(\beta r) - 2r h_{n+1}(\beta r) \right];$$

$$A_n = A \frac{\varepsilon_3 \varepsilon_{42} - \varepsilon_4 \varepsilon_{32}}{\varepsilon_{31} \varepsilon_{42} - \varepsilon_{41} \varepsilon_{32}} \Big|_{r=R}; \quad B_n = B \frac{\varepsilon_4 \varepsilon_{31} - \varepsilon_3 \varepsilon_{41}}{\varepsilon_{31} \varepsilon_{42} - \varepsilon_{41} \varepsilon_{32}} \Big|_{r=R}.$$

Подставляя (5) и (6) в соотношение (2), получим:

$$U = \frac{\eta}{R} \left[ 3iA j_1(\alpha R) + A_1 h_1(\alpha R) - 2B_1 h_1(\beta R) \right],$$

где  $\eta = \rho_M / \rho_{\text{и}}$  ( $\rho_M$  – плотность массива горных пород).

В результате этого получено решение задачи о движении сфероидальной капсулы с известью как жесткого целого, которое характеризуется скоростью  $V$ .

Потенциалы рефракционных волн, прошедших в тело капсулы, удовлетворяют волновым уравнениям, волновые числа которых определяются по следующим формулам:

$$\alpha_{\text{и}}^2 = \frac{\alpha^2 \rho_{\text{и}}}{\lambda_{\text{и}} 2\mu_{\text{и}}}; \quad \beta_{\text{и}}^2 = \frac{v^2 \rho_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}}.$$

Под действием этих волн капсула с известью разрушается. Общее решение волновых уравнений для волн, распространяющихся по гашеной извести в капсуле и ограниченных в начале координат, имеет вид

$$\Phi^{**} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n j_n(\alpha_u r) P_n(\cos\theta); \quad \Psi^{**} = \sum_{n=0}^{\infty} D_n j_n(\beta_u r) P_n(\cos\theta), \quad (8)$$

где  $C_n, D_n$  – неизвестные постоянные.

Граничные условия на поверхности капсулы с гашеной известью состоят в равенстве напряжений и перемещений капсулы и продуктов детонации:

$$\left. \begin{aligned} U_r^0 + U_r^* &= U_r^{**}; & U_\theta^0 + U_\theta^* &= U_\theta^{**}; \\ \sigma_{rr}^0 + \sigma_{rr}^* &= \sigma_{rr}^{**}; & \sigma_{r\theta}^0 + \sigma_{r\theta}^* &= \sigma_{r\theta}^{**} \end{aligned} \right|_{r=R}. \quad (9)$$

Подставляя (5), (6) и (8) в условие (9), получим для каждого значения  $n$  систему четырех алгебраических уравнений для определения постоянных  $A_n, B_n, C_n$  и  $D_n$ .

В данном случае решена задача о напряженно-деформированном состоянии капсулы с гашеной известью. Используя теорию прочности для рассматриваемых материалов, определим время, за которое весь объем капсулы будет подвергаться нагружению, превышающему предел прочности. При этом следует отметить, что процесс разрушения капсулы будет наблюдаться при условии двойного пробега волн по ней и зависит от состояния плотности сыпучей забойки и извести ( $\rho_{\text{заб}} / \rho_{\text{и}}$ ). От этого соотношения зависит тип волн,

проходящих по капсуле. Если  $\rho_{и} < \rho_{заб}$ , разрушение капсулы с разлетом извести происходит за счет волны разрежения, если  $\rho_{и} > \rho_{заб}$  – за счет волны сжатия. Тогда время вылета общей забойки  $t_1$  и капсулы  $t_2$  соответственно равно:

$$H/V = t_1; \quad 2R/C_1 = t_2; \quad t_1 \geq t_2.$$

Из соотношения  $H/2R = V/C_1$  длина забойки  $H(l_{заб}) = (V \cdot 2R)/C_1$ .

При  $\rho_{и} > \rho_{заб}$  принимаем  $V = 500$  м/с,  $C_1 = 300$  м/с и  $R = 0,125$  м, длина забойки равна  $(500 \cdot 0,250)/300 = 0,416$  м.

При  $\rho_{и} < \rho_{заб}$  принимаем  $V = 300$  м/с,  $C_1 = 500$  м/с, длина забойки равна  $(300 \cdot 0,250)/500 = 0,15$  м.

Таким образом, используя методику, разработанную на основе теоретического обоснования механизма движения и разрушения капсулы, можно определить рациональную длину забойки, которая обеспечивает эффективное запирание скважины и нейтрализацию газов взрыва за счет разрушения капсулы с гашеной известью.

1. *Зберовский А. В.* Актуальные проблемы аэрологии и экологии карьеров Украины // Горный журнал. – М.: МГГУ. – 1999. – № 6. – С. 51–55.

2. *Пирский А. А., Вовк О. А., Сидоренко Н. А.* Некоторые вопросы улучшения экономической ситуации в Украине // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2001. – № 2. – С. 17–21.

3. *Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах* / Э. И. Ефремов, П. В. Бересневич, В. Д. Петренко и др. – Днепропетровск: Січ, 1996. – 179 с.

4. *Бережецкий А. Я., Воробьев В. Д., Пашков А. П.* Технологии взрывных работ и оценка их конкурентоспособности на карьерах // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2003. – № 9. – С. 39–53.

5. *Ефремов Э. И., Мартыненко В. П., Бережецкий А. Я.* Способ повышения эффективности взрыва и локализации пылегазовых выбросов // Вісник Кременчуцького держ. політех. ун-ту. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип. 2/2002(13). – С. 3–5.

6. *Ефремов Э. И., Мартыненко В. П., Бережецкий А. Я.* Способ повышения дробящего действия взрыва и снижения уровня загрязнения атмосферы карьера // Информ. бюл. Украинский союз инженеров-взрывников. – Комсомольск Полтавской обл.: УСИВ. – 2003. – № 2(6). – С. 40–43.

7. *Пат. 4754705 США.* Устройство для забойки скважин и способ его использования // Изобретения стран мира / Оpubл. 05.07.88. – Вып. 105.5. – 1989. – 3 с.

8. *Пат. 5936137А США.* Устройство для забойки скважин при выполнении взрывных работ // Изобретения стран мира / Оpubл. 10.08.99. – Вып. 81.8. – 2000. – 4 с.

9. *Снижение пылегазовых выбросов при массовых взрывах в карьерах* / В. Д. Воробьев, В. В. Захаров, А. Я. Бережецкий и др. // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2003. – Вип. 8. – С. 163–169.