

УДК 622.235.363

С.А. КАЛЯКИН (д.т.н., доц., проф.),

Н.Р. ШЕВЦОВ (д.т.н., проф., зав. каф.),

Р.А. СТРИЛЬЧУК (студент)

Донецкий национальный технический университет,

И.Ж. СИРАЧЕВ (инж., нач. производственного отдела)

ООО «Шахтостроительная компания «Донецкшахтопроходка»

УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАКЛАДНЫМИ ЗАРЯДАМИ ВВ В РЕЖИМЕ ГИДРОВЗРЫВАНИЯ

В работе приведены аналитические исследования, позволившие установить параметры разрушения твердых материалов взрывом накладных зарядов в водяной оболочке в зависимости от детонационных показателей ВВ и относительной массы заряда.

Ключевые слова: накладной заряд, водяная оболочка, детонация, импульс взрыва, предел прочности материал.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В угольных шахтах наиболее широко используется взрывная технология разрушения пород при проведении горных выработок шпуровым методом. Гораздо реже и в основном при специальных взрывных работах используется метод накладных зарядов. В строительстве для разрушения фундаментов, стен и железобетонных конструкций применяют как шпуровой метод, так и метод накладных зарядов при производстве взрывных работ. Отличительной особенностью метода накладных зарядов от шпурового является его мобильность, отсутствие бурильного оборудования для бурения шпуров, однако он имеет чрезмерный расход взрывчатых веществ (ВВ) по сравнению со шпуровым методом.

Анализ исследований и публикаций. В работе [1] показано, что при расчете массы накладного заряда необходимо учитывать степень заглубления заряда ВВ в грунт, как производную от коэффициента f_0 , который определяет разницу между взрывом открытого и заглубленного зарядов. При этом принимают $f_0 = 1$ для полностью заглубленного заряда ВВ и $f_0 = 0,2$, если заряд находится на поверхности. Таким образом получается, что эффективность взрывного разрушения породы накладным зарядом ВВ в 5 раз ниже, чем у заглубленного в грунт заряда ВВ.

На практике в карьерах удельный расход при взрыве накладных зарядов ВВ может быть, по данным работ [2-5], в 5...15 раз больше, чем при шпуровом методе взрывных работ. Это ставит задачу о необходимости повышения эффективности взрывного разрушающего действия накладных зарядов и существенного снижения расхода ВВ.

Анализ последних данных исследований и публикаций показал, что наиболее эффективными накладными зарядами являются заряды, в которых ВВ окружено водяной оболочкой и разрушение пород и строительных конструкций происходит в режиме гидровзрывания. В этом случае резко повышается эффективность взрывного действия накладного заряда и удельный расход ВВ снижается в 3...10 раз [6].

При строительстве, реконструкции и ремонте промышленных предприятий и других объектов народного хозяйства, а также при ликвидации морально и физически устаревшего поверхностного комплекса, закрываемых по программе реструктуризации угольной промышленности Украины, постоянно возникает необходи-

мость в проведении работ по разрушению горных пород и строительных конструкций.

На кафедре «Строительство шахт и подземных сооружений» ДонНТУ разработан способ разрушения твердых тел накладными зарядами в водяной оболочке и устройство для его осуществления [7]. Его техническая сущность заключается в том, что заряд ВВ размещается в эластичном полиэтиленовом сосуде, заполненном водой, который прикладывается к поверхности разрушаемого объекта так, чтобы заряд ВВ контактировал с ним своей боковой поверхностью через водяную прослойку [7, 8]. В то же время оптимальные параметры этой, в принципе, новой конструкции заряда для пород и строительных конструкций до настоящего времени не были определены. Поэтому возникла необходимость исследования механизма разрушения твердых материалов при взрыве накладных зарядов в подобной водонаполненной оболочке.

Постановка задач исследований. Целью работы является исследование оптимальных параметров разрушения горных пород и строительных конструкций накладными зарядами при гидровзрывании ВВ. При этом необходимо обосновать эффективную оптимальную толщину жидкостной оболочки вокруг заряда ВВ и уточнить коэффициент снижения удельного расхода ВВ при гидровзрывании.

Изложение основного материала и результаты. Гидровзрывание – это способ взрывания заряда ВВ в водяном окружении. Поэтому действие взрыва при таком способе взрывания на горные породы комбинированные с одной стороны ударной волны и, ударносжатой водой, а с другой продуктами взрыва ВВ. Вследствие чего повышается эффективность действия взрыва заряда ВВ на разрушаемую среду и происходит снижение удельного расхода ВВ. Для успешного применения гидровзрывания ВВ необходимо, в первую очередь, обосновать оптимальное значение слоя воды между зарядом ВВ и поверхностью разрушаемого объекта. При этом принимаем во внимание то, что объем разрушения прямопропорционален удельному импульсу взрыва заряда ВВ и величине пикового давления во фронте ударной волны в водяной оболочке и обратно пропорционален крепости материала разрушаемого объект. Аналогично предположим, что и удельный расход ВВ при разрушении горных пород таким же образом изменяется. Хотя для более точной оценки необходимо знать зависимость изменения удельного расхода ВВ от удельного импульса ВВ шпурового заряда и соответственно накладного заряда ВВ.

Схема разрушения твердых материалов накладными зарядами в водяной оболочке приведена на рис. 1.

На первом этапе исследований решается задача по установлению оптимальной величины оболочки вокруг заряда ВВ. Эта и все последующие задачи решаются применительно к взрыванию сосредоточенного заряда, имеющего сферическую форму.

Общеизвестно, что приведенный к сосредоточенному сферическому заряду ВВ его радиус рассчитывается по следующей формуле:

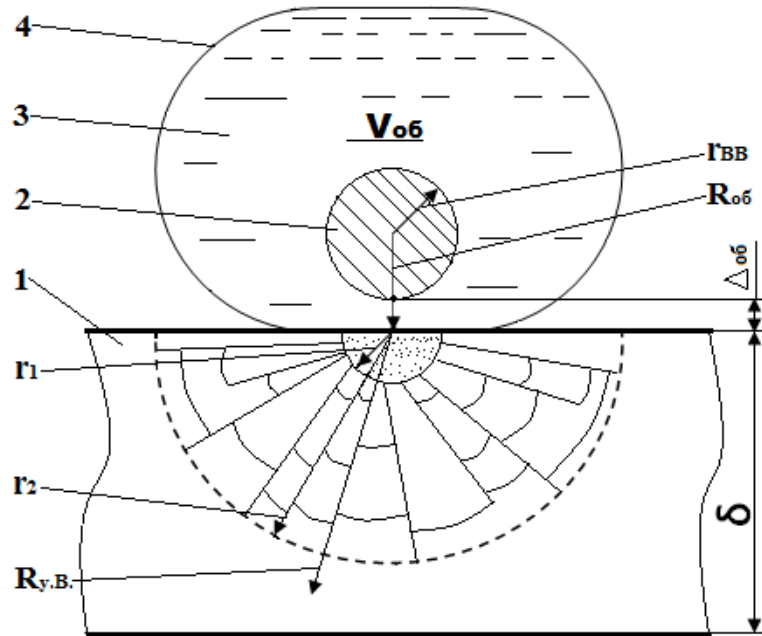
$$r_{BB} = \sqrt[3]{\frac{3m_{BB}}{4\pi\rho_{BB}}},$$

где m_{BB} – масса взрываемого заряда ВВ, кг;

ρ_{BB} – плотность ВВ (плотность патронирования), кг/м³.

В качестве примера рассчитаем значения $m_{ВВ}$ для наиболее часто применяющихся на практике накладных цилиндрических зарядов из порошкообразных ВВ ($\rho_{ВВ} = 1050 \text{ кг/м}^3$):

m, кг	0,3	0,6	0,9	1,5
$\Gamma_{ВВ}$, м	0,041	0,051	0,059	0,070



1 – разрушаемый объект (негабарит горной породы, элементы зданий и сооружений и др.); 2 – заряд ВВ; 3 – водяная оболочка; 4 – эластичная оболочка; $\Gamma_{ВВ}$ – приведенный к сосредоточенному сферическому заряду радиус ВВ; $V_{об}$ – минимально необходимый объем водяной оболочки вокруг заряда ВВ; $\Delta_{об}$ – оптимальная толщина водяного слоя между зарядом ВВ и разрушаемым объектом; δ – толщина разрушаемого объекта; $R_{об}$ – кратчайший путь действия продуктов взрыва ВВ в водяной оболочке до их встречи с твердой преградой (разрушаемым объектом) и образования в воде ударной волны; $R_{ув}$ – радиус действия ударной волны в материале разрушаемого объекта.

Рис. 1 Схема разрушения объектов накладным зарядом в режиме гидровзрыва ВВ

Рассмотрим процесс расширения в жидкости продуктов реальной детонации ВВ. В его основе рассмотрим задачу о расширении сферы продуктов детонации в воде, приведенную Ф.А. Баумом в работе [7], которую приводим в следующей реакции, предложенной С.А. Калякиным.

Для сферической волны в несжимаемой жидкости основные уравнения гидродинамики имеют вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho_e} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} = 0 ; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} = 0 \quad (1)$$

и допускают следующее общее решение:

$$ur^2 = f(t) ; \quad \frac{P - \varphi(t)}{\rho_e} = \frac{df}{rdt} - \frac{f^2}{2r^4}, \quad (2)$$

где $f(t)$ и $\varphi(t)$ – произвольные функции времени, причем, с большой точностью можно принять, что $\varphi(t) = P_\epsilon$;

$P_\epsilon, \rho_\epsilon$ – давление и плотность воды соответственно.

При этом закон движения границы раздела между продуктами детонации и водой можно записать в виде:

$$P_1 \left(\frac{r_1}{r} \right)^{3n} = P_\epsilon + \rho_\epsilon \left[\frac{df}{rdt} - \frac{f^2}{2r^4} \right], \quad (3)$$

причем, на границе раздела

$$\frac{df}{dt} = \frac{du}{dt} r^2 + 2ur \frac{dr}{dt} = \frac{du}{dt} r^2 + 2u^2 r = \frac{1}{2} \frac{du^2}{dr} r^2 + 2u^2 r$$

Поэтому уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{du^2}{dr} + 3 \frac{u^2}{r} = \frac{2P_1}{\rho_\epsilon} \cdot \frac{r_1^{3n}}{r^{3(n+1)}} - \frac{2P_\epsilon}{\rho_\epsilon r} \quad (4)$$

Его решение при условии, что $u = u_1$ при $r = r_1$, т.е. скорость продуктов детонации ВВ на границе раздела «продукты детонации – вода» и воды равны и имеют вид:

$$u^2 = \left(u_1^2 + \frac{2}{3(n-1)} \cdot \frac{P}{\rho_\epsilon} + \frac{2P_\epsilon}{3\rho_\epsilon} \right) \left(\frac{r_1}{r} \right)^3 - \left[\frac{2}{3(n-1)} \cdot \frac{P}{\rho_\epsilon} \cdot \left(\frac{r_1}{r} \right)^{3n} + \frac{2P_\epsilon}{3\rho_\epsilon} \right] \quad (5)$$

Принимая во внимание, что продукты детонации в момент удара о воду тормозятся, предельное расстояние, которое они достигают, можно определить из уравнения (5), полагая в нем, что $u = 0$ (продукты детонации заторможены). Затем скорость $u_1 = u_\epsilon$, т.к. вода приобретает скорость расширяющегося потока уравновешивающего остаточное давление продуктов детонации в полости – $\rho_\epsilon u_\epsilon^2 = P_\kappa = P_\epsilon$.

Тогда при условии, что $P_1 = P_n$, а $r_1 = r_{BB}$, получим:

$$\frac{P_n}{n-1} \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^{3n} + P_k = \left(\frac{3}{2} P_k + P_k + \frac{P_n}{n-1} \right) \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^3 \quad (6)$$

Раскрываем скобки и делим на P_k получаем:

$$\frac{P_n}{(n-1) \cdot P_k} \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^{3n} + 1 = 2,5 \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^3 + \frac{P_n}{(n-1) \cdot P_k} \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^3 \quad (7)$$

Окончательно уравнение (7) преобразуем к виду:

$$\left(\frac{r_{BB}}{r}\right)^3 = 2,5 + \frac{P_n}{(n-1) \cdot P_k} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{BB}}{r}\right)^n\right] \quad (8)$$

Принимаем во внимание, что $r_{BB} \ll r$, а $n \approx 3$, то можно установить, что $\left[1 - \left(\frac{r_{BB}}{r}\right)^n\right] \approx 1$, т.е. мало отличается от единицы. Тогда окончательно получим:

$$P_k = \frac{P_n}{2 \left[\left(\frac{r}{r_{BB}}\right)^3 - 2,5 \right]} \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что давление воды подвергнутой при взрыве ВВ ударному действию продуктов детонации должно соответствовать давлению P_k , которое резко снижается с расстоянием (r). Однако при $\left(\frac{r}{r_{BB}}\right)^3 = 3,5$ давление воды (P_k) в окрестностях заряда ВВ будет всего в 2 раза ниже, чем давление во фронте детонационной волны (P_n). При этом радиус ударного действия на воду составит $1,52r_{BB}$. Вода в этой области будет иметь давление равное давлению продуктов детонации – $P_k(r)$. Плотность продуктов детонации в момент торможения в воде сос-

тавит
$$\rho_k = \frac{n+1}{n} \rho_{BB} \left(\frac{P_k}{P_n}\right)^{\frac{1}{n}}.$$

Под действием такого давления продуктов детонации ВВ вода ударно сжимается до высокой плотности.

В настоящее время известно уравнение состояния воды для области высоких давлений в виде уравнения [10]:

$$P_c - P_0 = A(\rho_c^k \rho_0^k), \text{ кг / см}^2, \quad (10)$$

где P_c, P_0 – давления ударно сжатой воды и начальное давление воды соответственно, кг/см²;

ρ_c, ρ_0 – плотность ударно сжатой воды и ее начальная плотность соответственно, г/см³;

A, k – коэффициенты в уравнении состояния воды, соответственно равные $A = 4250, k = 6,29$.

Давление в продуктах взрыва (ПВ) при гидровзрывании равно:

$$P_k = 4,335 \cdot 10^8 \left(\frac{\rho_{BB}}{\rho_{H_2O}}\right)^{6,20}, \text{ Па}$$

Плотность ударно-сжатой воды в момент времени, когда в области взаимодействия продуктов детонации ВВ и воды устанавливается давление, при котором они полностью заторможены равна ρ_c . Из уравнения (10) можно определить плотность ударно-сжатой воды в момент, когда давление в ней достигнет величины P_k :

$$P_c - P_0 \approx P_k = A(\rho_c^k - \rho_0^k).$$

Учитываем, что при $u_{\text{ПД}} = u_{\text{УВ}}$ величина $P_k = P_H/2$ и пренебрегая начальным атмосферным давлением P_0 , окончательно получим:

$$\rho_c = \left(\frac{P_H}{2 \cdot A} + \rho_0 \right)^{0,159}, \text{ г / см}^3. \quad (11)$$

Совместное решение уравнения (11) с уравнением состояния продуктов детонации при их расширении от P_H до P_k дает поразительный результат: в момент торможения продуктов детонации ВВ и ударного сжатия воды до давления P_k происходит выравнивание их плотностей. В конце концов они оказываются равны $\rho_c = \rho_{\text{ВВ}}$. Этот замечательный результат позволяет с одной стороны раскрыть положительный эффект гидровзрывания, который заключается в том, что при детонации ВВ в воде вокруг заряда образуется область ударно-сжатой воды, и заторможенных продуктов детонации, эта область имеет объем в 3,5 раза больше, чем первоначальный объем заряда ВВ. В этом объеме устанавливается давление P_k , равное половине давления детонации ВВ, а плотность ударно-сжатой воды ρ_c равна плотности продуктов детонации ВВ.

Тогда минимально допустимый объем водяной оболочки вокруг заряда ВВ равен:

$$V_{\text{об min}} = 3,5 V_{\text{ВВ}} \quad (12)$$

Оптимальный размер водяной оболочки между центром заряда ВВ и разрушаемым объектом (кратчайший путь прохождения ударной волны в воде до встречи с твердой преградой) будет равен

$$R_{\text{об}} = \left(\frac{10,5 V_{\text{ВВ}}}{4 \pi} \right)^{0,333} = 1,38 \left(\frac{m_{\text{ВВ}}}{\pi \rho_{\text{ВВ}}} \right)^{0,33}, \text{ м} \quad (13)$$

Из рис. 1 получим, что оптимальная толщина водяного слоя между поверхностями заряда и разрушаемого объекта равна

$$\Delta_{\text{об}} = R_{\text{об}} - r_{\text{ВВ}}. \quad (14)$$

Расчеты по формулам (12-14) для $m_{\text{ВВ}} = 0,3$ кг и $\rho_{\text{ВВ}} = 1050$ кг/м³ дают следующие результаты:

$$V_{\text{об min}} = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, R_{\text{об}} = 0,062 \text{ м}, \Delta_{\text{об}} = 0,021 \text{ м}.$$

Перед решением задачи по установлению толщины объекта, который способен разрушить взрыв накладного заряда в водяной оболочке, рассмотрим вкратце механизм разрушения твердых тел взрывом заряда ВВ.

При взрыве заряда на разрушаемый массив действует динамический удар, создаваемый продуктами детонации ВВ. В твердом теле возникают ударные волны, наиболее интенсивные у заряда и ослабляющиеся по мере удаления от него. В массиве образуются зоны: сжатия (раздавливания, дробления, вытеснения и уплотнения), трещинообразования (разрывов, растрескивания) и сотрясения (колебания твердой среды за пределами зоны разрушения) [3; 5]. Первая зона мала и имеет четкую границу с зоной трещинообразования.

Зоны вытеснения и разрывов на практике рассматривают как одну общую зону – зону разрушения (камуфлета).

Радиус зоны камуфлета равен [5]:

$$r_2 = r_2 \cdot r_{BB},$$

где r_2 - приведенный радиус зоны камуфлета устанавливается из эксперимента.

Вторая зона характеризуется образованием сети радиальных и кольцевых (прерывистых сферических) трещин. Хотя инженерами (военными и гражданскими) накоплен опыт расчета зарядов, однако до сих пор нет строгой теории формирования второй зоны, ни достаточно точных эмпирических формул для ее определения.

Первая зона характеризует способность ВВ при взрыве разрушать твердые преграды, непосредственно прилегающие к заряду или отстоящие от него на расстояние не более двух-трех радиусов заряда [5].

До выполнения настоящей работы отсутствовало аналитическое описание радиуса этой зоны (r_1) при контакте заряда ВВ с породой. В то же время положения современной теории взрыва дают возможность впервые решить эту задачу.

Накладной заряд ВВ с водяной оболочкой разрушает объект, имеющий определенную толщину в зависимости от времени действия на него ударной волны с параметрами, превосходящими предел прочности материала:

$$P_{y\partial} \geq [\sigma]_{np} \quad (15)$$

Начальные параметры ударной волны в водяной оболочке определяются из уравнений:

$$D_y = \frac{P_k}{\rho_o U_\epsilon} U_\epsilon = \frac{D_{BB}}{n+1} \left[(n+1) - (n-1) \cdot \left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{0,333} \right];$$

так как показатель политропы продуктов детонации ВВ $n \approx 3$, то тогда

$$U_\epsilon = \frac{1}{4} D_{BB} \left[4 - 3 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{1/3} \right] = 0,404 D_{BB}, \text{ а}$$

$$D_y = \frac{P_n}{0,81 \rho_o \cdot D_{BB}}$$

или

$$D_y = \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{0,81 \rho_o \cdot D_{BB} (n+1)} = 0,31 D \left(\frac{\rho_{BB}}{\rho_o} \right), \text{ — м / с ;}$$

где D_y – скорость ударной волны в водяной оболочке;

P_n – давление детонации ВВ;

ρ_{BB}, ρ_o – плотность ВВ и воды соответственно;

D_{BB} – скорость детонации ВВ;

U_ϵ – массовая скорость ударносжатой воды за фронтом ударной волны.

Откольная прочность материала разрушаемого объекта (породы) равна:

$$[\sigma]_{np} = \frac{1}{2} \cdot \rho_n \cdot C_\partial \cdot U_{кр},$$

где C_∂ – скорость звука в материале;

$U_{кр} \approx 1,0 - 1,5$ м/с – критическая скорость откола.

Давление ударносжатой воды при разрушении материала на границе контакта равно:

$$P_y^e = 0,31 \cdot \rho_{BB} \cdot D_{BB} \cdot D_y,$$

Давление ударной волны в разрушаемой породе P_y и (в момент входа в породу) равно:

$$P_y^n = P_y^e \cdot k_{np},$$

где k_{np} – коэффициент преломления УВ.

$$k_{np} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_n \cdot C_o}{\rho_y^e \cdot D_y}},$$

где ρ_n, C_o – плотность породы и скорость звука в породе соответственно;

ρ_y^e, D_y – плотность ударносжатой воды и скорости УВ соответственно;

Примерно толщину $\delta_{кр}$, которую может разрушить УВ в породе (строительной конструкции) можно определить по следующей формуле:

$$r_1 = R_{y\delta} - 1,52 \cdot r_{BB},$$

в зависимости от радиуса действия УВ в твердом материале

$$R_{y\delta} = 1,52 \cdot r_{BB} \left(\frac{P_y^n}{[\sigma]_{np}} \right)^{\frac{1}{3\gamma}}, \quad \text{м}$$

где γ – показатель политропы в уравнении состояния горных пород разрушаемых взрывом (по Г.И. Покровскому $\gamma \approx 8$).

Следовательно для того, чтобы знать точно толщину разрушаемого объекта, необходимо определить закон затухания ударной волны в материале разрушаемого объекта в зависимости от его толщины, и по условию (14) сравнивая $[\sigma]_{np}$ и P_y^n определить критическую толщину разрушения материала.

В качестве примера выполним расчет r_1 для следующих условий: горная порода – порфенит, $\rho_n = 2700$ м/с, $C_o = 5400$ м/с, $\rho_y^e = 1080$ кг/м³, $D_y = 1600$ м/с, $r_{BB} = 0,041$ м, $\gamma = 8$, $[\sigma]_{np} = 16$ МПа, $P_n = 5,7 \cdot 10^9$ Па, $m_{BB} = 0,3$ кг, $r_{BB} = 0,041$ м.

Решение

$$P_y^e \approx \frac{P_n}{2},$$

$$K_{np} = \frac{1}{1 + \frac{2700 \cdot 5400}{1080 \cdot 1600}} = 0,212,$$

$$P_y^n = \frac{5,7 \cdot 10^9}{2} \cdot 0,212 = 6,04 \cdot 10^8 \text{ МПа},$$

$$R_{y\delta} = 1,52 \cdot 0,041 \cdot \left(\frac{6,04 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^7} \right)^{\frac{1}{24}} = 0,0275 \quad \text{м},$$

$$r_1 = 0,0275 - 0,041 = 0,0315 \quad \text{м}.$$

Представим параметр $P_{ув}$ в следующем численном виде:

$$P_{ув} = 1,768 \cdot r_{BB}.$$

Тогда

$$r_1 = 01,768 \cdot r_{BB} - r_{BB} = 0,768 \cdot r_{BB}. \quad (16)$$

Таким образом, при разрушении скальных пород взрывом мощных ВВ радиус дробления равен $r_1 = 0,768 \cdot r_{BB}$, м.

Вместе с тем для решения практических задач по разрушению горных пород и строительных конструкций необходимо знать радиус зоны разрушения (r_2).

Достаточную для практики проектную величину радиуса зоны разрушения установим через соотношения между проведенными радиусами зон дробления и разрушения, т.е. r_2/r_1 .

Системный анализ данных, взятых из опубликованных работ по разрушению горных пород взрывом, позволил в работе [1] установить приведенный радиус зоны разрушения, равный в зависимости от прочности пород на сжатие, а именно:

$$\bar{r}_2 = 18,7 \dots 34,0.$$

При взрывании сосредоточенного заряда мощного ВВ (тротила или аммонита БЖВ и др.) в скальных породах ($f = 8 \dots 13$) приведенный радиус зоны сжатия

$$\bar{r}_{1cp} = 1,85.$$

(дробления) равен [5]: $r_1 = (1,5 \dots 2,2)$ при среднем его значении -

Исходя из этих приведенных значений коэффициентов пропорциональности r_2 и r_1 получим:

$$r_2 = (10,1 \dots 18,4) \cdot r_1.$$

Выразим радиус дробления через радиус ВВ (16), получим интервал изменения радиуса разрушения твердых материалов взрывом накладного заряда в водонаполненной оболочке, численно равному критической толщине «пластины» материала, которую способен разрушить упомянутый заряд ($\delta_{кр}$), а именно:

$$r_2 = \delta_{кр} = (10,1 \dots 18,4) \cdot 0,768 \cdot r_{BB}$$

или

$$r_2 = \delta_{кр} = (7,8 \dots 14,1) \cdot r_{BB} \quad (17)$$

По полученным зависимостям (16, 17) рассчитаем значения r_1 и $\delta_{кр}$ для наиболее распространенных величин зарядов ВВ:

для $m_{ВВ} = 0,3$ кг

$r_1 = 0,032$ м; $\delta_{кр} = (0,32 \dots 0,58)$ м;

для $m_{ВВ} = 0,6$ кг

$r_1 = 0,039$ м; $\delta_{кр} = (0,40 \dots 0,72)$ м.

Важным остается вопрос, а на сколько можно ожидать снижение удельного расхода ВВ при гидровзрывании по сравнению со взрыванием открытых накладных зарядов.

Очевидно, что такое снижение удельного расхода определяется отношением импульсов взрыва накладного заряда в водяной оболочке (J_n^r) и открытого («сухого») накладного заряда (J_n^c), а именно:

$$J_{n.отн.} = \frac{J_n^r}{J_n^c}. \quad (18)$$

Зная величину этого отношения ($J_{отн.}$) представляется возможным скорректировать установленную практикой [1-5] значение увеличения удельного расхода ВВ на разрушение твердых материалов накладными зарядами по сравнению со шпуровым методом.

Для определения импульса взрыва накладного заряда получены следующие уравнения [12]:

при взрывании в водяной оболочке (при равенстве плотности ударносжатой воды и продуктов взрыва ВВ):

$$J_n^r = 0,2 S \rho_{ВВ} \cdot r_{ВВ} \cdot D_{ВВ} \left(1 + \sqrt{\frac{V_{об} \cdot \rho_{об}}{V_{ВВ} \cdot \rho_{ВВ}}} \right) = 0,2 m_{ВВ} D_{ВВ} \left(1 + \sqrt{\frac{3,5 \cdot \rho_{об}}{\rho_{ВВ}}} \right) = 0,2 m_{ВВ} D_{ВВ} \left(1 + 1,87 \sqrt{\frac{\rho_{об}}{\rho_{ВВ}}} \right) \approx 0,57 m_{ВВ} D_{ВВ};$$

при взрывании открытого заряда

$$J_n^c = 0,2 m_{ВВ} D_{ВВ}.$$

Тогда по формуле (18) имеем:

$$J_{отн.} = \frac{J_n^r}{J_n^c} = \frac{0,57 \cdot m_{ВВ} \cdot D_{ВВ}}{0,2 m_{ВВ} D_{ВВ}} = 2,85 \text{ раза}.$$

Ранее проведенные эксперименты по ликвидации угольного склада шахты № 2 «Новгородовская» [13] подтверждают установленную степень эффективности гидровзрывания по сравнению со взрыванием накладных зарядов. Стены склада железобетонные толщиной 0,5 м (металлические опоры в бетоне стены были представлены из рельс Р-24 и спецпрофиля СВП-27, связанные между собой металлической арматурой диаметром 6...8 мм через 0,9 м). В качестве ВВ использовался пластичный детонирующий кабель разминирования ДКРП-4 диаметром 70 мм (70% гексогена, $D_{ВВ} = 7,8$ км/с, теплота взрыва – 6270 кДж/кг, плотность 1,62 г/см³). Накладной заряд массой 1,0 кг и длиной 0,25 м взрывался практически «сухим» (наполовину оголенным при недостаточном объеме воды из-за сильного мороза). Заряды на стене размещались в 3 ряда по вертикали при расстоянии между рядами 1,0 м и зарядами в ряду – 1,3 м. После взрывания стена не разрушилась.

Действительно, уменьшив в 2,85 раз $\delta_{кр}$ в формуле (17) получим, что для случая взрывания «сухих» накладных зарядов его значение будет равно 0,25 м.

Следовательно, при взрывании накладных зарядов в водяной оболочке удельный расход ВВ будет превышать удельный расход ВВ при шпуровом методе взрывания не в 5...15 раз, как имеет место при взрывании открытых накладных за-

рядов [1-5], а в $\frac{5}{2,85} \dots \frac{15}{2,85} = 1,8 \dots 5,3$ *раза* .

Это означает, что с достаточной для практики точностью можно считать, что степень повышения удельного расхода ВВ при гидровзрывании накладных зарядов по сравнению со шпуровым методом взрывания при наличии забойки в шпуре равна:

$$K = 1,8 \dots 5,3. \quad (19)$$

Экспериментальное подтверждение достоверности зависимости (19) получено при разрушении здания котельной (стены кирпичные толщиной 0,38 м) в процессе ликвидации поверхностного комплекса закрытой шахты № 2 шахтоурпавления им. газеты «Правда» накладными зарядами аммонита Т-19 массой 0,6 кг и 0,9 кг (заряды чередовались через 0,6 м) в водяной оболочке удельный расход ВВ составил 8,3 кг/м³ [8]. При разрушении зданий такой конструкции шпуровым методом удельный расход ВВ равен 1,8 кг/м³ [8]. Следовательно,

$J_{отн} = \frac{8,3}{1,8} = 4,6$ *раза* , т.е. располагается в пределах установленного (19) диапазона изменений.

Кроме того, эти эксперименты подтвердили установленные значения $\delta_{кр}$, а именно: взрывом накладных зарядов в водяной оболочке разрушена кирпичная стена толщиной 0,38 м [8], что меньше установленного нижнего предела значений $\delta_{кр}$, равного 0,40 м.

Таким образом, предложенный метод определения удельного расхода позволяет, как было сказано в работе [14], получить результат, который может быть использован в процессе разработки проектов по разрушению объектов накладными зарядами в режиме гидровзрывания.

Выводы

Установлена минимально эффективная толщина водяной оболочки между зарядом ВВ и поверхностью разрушаемого материала.

Предложен метод определения толщины разрушаемого материала в зависимости от параметров падающей на него ударной волны и функция затухания ударной волны в материале с учетом его откольной прочности.

Дана сравнительная оценка эффективности взрывания накладных зарядов с водяными оболочками и шпуровых зарядов с забойкой. Показано, что ожидаемое снижение удельного расхода ВВ при гидровзрывании по сравнению со взрыванием открытых накладных зарядов достигается в 2,85 раза.

Работа будет продолжена в направлении установления зависимости удельного расхода ВВ на разрушение твердого материала от импульса взрыва шпуровых и накладных зарядов.

Список использованной литературы

1. Покровский Г.И. Взрыв. – 4-е изд. перераб. и доп. / Г.И. Покровский. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
2. Асонов В.А. Взрывные работы. В.А. Асонов. – М.: Углетехиздат, 1948. – 280 с.

3. Таранов П.Я. Буровзрывные работы / П.Я. Таранов. – М.: Углетехиздат, 1958. – 370 с.
4. Ефремов Э.И. Справочник по взрывным работам / Э.И. Ефремов, А.А. Вовк. – К.: Наукова Думка, 1983. – 327 с.
5. Шевцов М.Р. Руйнування гірських порід вибухом. Підручник для вузів. – 4-е видання перероб. і доп. / М.Р. Шевцов, П.Я. Таранов, В.В. Левіт, О.Г. Гудзь. – Донецьк: ТОВ «Лебідь», 2003. – 272 с.
6. Шустов Н.В. Взрывогидравлический способ разрушения твердых сред / Н.В. Шустов. – М.: Недра, 1968. – 48 с.
7. Декларацийний патент на винахід № 42339А. Україна, F42D3/00, E21C37/00. Спосіб руйнування твердих матеріалів / Шевцов М.Р., Макаров А.А., Сірацьов І.Ж. – 16.01.01; Опубл. 15.10.01. Бюл. № 9.
8. Шевцов М.Р. Промислові вибухові технології: Навчальний посібник для вузів / М.Р. Шевцов, В.В. Левіт, О.І. Рубльова. – Донецьк: Норд-Прес, 2010. – 283 с.
9. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. – М.: Физматгиз, 1959. – 799 с.
10. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва / Ю.С. Яковлев. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 312 с.
11. Фам Ван Лан. Обоснование безопасных параметров камуфлетного взрывания при открытом способе разрушения горных пород и строительных конструкций / Фам Ван Лан: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / Донецкий национальный технический университет. – Донецк, 2001. – 20 с.
12. Калякин С.А. Значение факторов, определяющих безопасные и эффективные параметры способа обратного инициирования заряда ВВ / Калякин С.А. / Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах / Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2004. – С. 164-177.
13. Проект производства взрывных работ по разрушению железобетонной стены угольного склада шахты № 2 «Новогородовская» по технологии гидровзрывания, разработанной кафедрой СШ и ПС ДонНТУ: БВР-2002-03-ГЦ: Согл. ОАО «Донецкшахтострой» 22.11.02. – Донецк: АООТ «Шахтспецстрой», 2002. – 14 с.
14. Развитие научных основ системы гидровзрывания в шахтах, опасных по газу или пыли: Отчет о НИР (заключительный) / Донецкий национальный технический университет. - № ГР0105U002292. – Донецк, 2007. – 225 с.

Надійшла до редакції 29.03.2013

С.О. Калякін, М.Р. Шевцов, Р.О. Стрільчук, І.Ж. Сірацьов

УМОВИ РУЙНУВАННЯ ГІРНИЧИХ ПОРІД ТА БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НАКЛАДНИМИ ЗАРЯДАМИ ВР В РЕЖИМІ ГІДРОПІДРИВАННЯ

За допомогою аналітичних досліджень встановлено параметри руйнування твердих матеріалів вибухом накладних зарядів, що містяться у водяній оболонці.

Ключові слова: накладний заряд, водяна оболонка, детонація, імпульс вибуху, твердий матеріал.

S.A. Kaljakin, Shevtsov, R.A. Streltnuk, I.J. Sirathev

THE CONDITIONS OF MINING ROCK AND BUILDING CONSTRUCTIONS DESBRUCTION BY THE MUD CAP CHARGES OF EXPLOSIVE AGENTS IN THE HUDRAULIC EXPLOSION CONDITIONS.

The parameters of hard materials desbrsctions by the mad cap charges in the water casing explosive had been determined by means of the analytic reserds.

Keywords: mud cap charge, water casing, detonation, explosion impuls, hard material.