

УДК 622.233:622.236

О МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ВВ С ГИДРОЗАБОЙКОЙ

Калякин С.А. (ООО «СНЭЙК», г. Донецк, Украина)
Шевцов Н.Р., Лабинский К.Н. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Проаналізовано значний обсяг аналітичних та експериментальних даних. Вперше встановлений механізм та ступінь підвищення ефективності руйнування гірничих порід при гидровисадженні. Визначені напрямки розробки раціональної конструкції заряду.

The analytic and experimental data level was analyzed in this article. The mechanism and the degree of rising of effectiveness of hydroexplosive works were worked out. The ways of rational development of blast-hole charge's construction were determined here.

Взрывание зарядов ВВ в окружении воды позволяет достигать высокой эффективности разрушения горных пород взрывом и исключить возможность воспламенения метана или угольной пыли при взрывных работах в угольных шахтах. Этот вид взрывания зарядов ВВ получил название гидровзрывания. Гидровзрывание в угольных шахтах, опасных по газу или разрабатывающих пласты, опасные по взрывам угольной пыли, является перспективным направлением развития взрывных работ. Однако его внедрение требует решения целого ряда научных и практических задач в рамках проблем, связанных с повышением эффективности и безопасности взрывных работ. Начало решения данной проблемы положено в работах [1, 2, 3], которые посвящены разработке общей теории гидровзрывания зарядов ВВ при разрушении горных пород, обоснованию эффективной длины донноустьевой гидрозабойки, исследованию энергетических показателей ВВ.

Вместе с тем ряд вопросов в этой многогранной и сложной задаче еще не достаточно изучен и требует дальнейших исследований. Несомненный научный и практический интерес вызывает процесс взаимодействия продуктов детонации ВВ с окружающей заряд водой. Поэтому данная статья посвящена исследованию механизма взаимодействия продуктов детонации заряда ВВ с водой, окружающей заряд или находящейся в гидрозабойке.

Исследования механизма взаимодействия продуктов детонации заряда ВВ с водой, контактирующей с зарядом, связана прежде всего с необходимостью снижения удельного расхода ВВ при таком виде взрывания за счет возрастания действия взрывного эффекта на окружающий массив пород.

В основу процесса разрушения горных пород взрывом положены принципы, предложенные Ф.А. Баумом в работе [4]. Согласно этой работе, можно положить, что эффективность взрывания ВВ в горном массиве определяется следующим уравнением:

$$\frac{V_K}{V_H} = \left(\frac{P_H}{P_K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{P_K}{P_{[\sigma]}} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (1)$$

где V_H – начальный объем взрывной камеры, в которой расположен заряд ВВ;

V_K – конечный объем разрушенной взрывом породы, определяемый воронкой выброса;

P_H – начальное давление продуктов детонации ВВ;

P_K – давление продуктов детонации в точке сопряжения ударной адиабаты ВВ с адиабатой продуктов взрыва;

$P_{[\sigma]}$ – давление продуктов взрыва необходимое для разрушения окружающих заряд ВВ горных пород;

n – показатель политропы продуктов детонации ВВ;

k – показатель адиабаты газообразных продуктов взрыва.

Из уравнения (1) можно легко получить следующее уравнение:

$$q = \frac{m_{BB}}{V_K} = \frac{\rho_{BB}}{\left(\frac{P_H}{P_K}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{P_K}{P_{[\sigma]}}\right)^{\frac{1}{k}}}, \quad (2)$$

где q – удельный расход ВВ при разрушении горной породы;
 m_{BB} – масса ВВ в заряде;
 ρ_{BB} – плотность заряжения ВВ в зарядной камере.

В работах Д.Б. Зельдовича, Л.Ф. Ландау и К.П. Станюковича [5, 6] даны методы решения задачи определения давления P_K в точке, где сопрягается уравнение $PV^n = const$ с уравнением $PV^K = const$.

Приведем в несколько измененном виде окончательные уравнения решения этой задачи:

$$P_K = \left[Q_v - \frac{D^2}{2 \cdot (n^2 - 1)} \right] \cdot \rho_k \cdot (k - 1), \quad (3)$$

где Q_v – удельная теплота взрыва ВВ;
 D – скорость детонации ВВ;
 ρ_k – плотность продуктов взрыва в точке сопряжения.

Исходя из уравнения состояния продуктов детонации ВВ в виде $P = A\rho^n$ получим:

$$\frac{P_H}{\rho_n^n} = \frac{P_K}{\rho_k^n}, \quad (4)$$

где ρ_n – давление продуктов детонации во фронте детонационной волны;

или

$$P_K = P_H \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_n}\right)^n. \quad (5)$$

Приравняв (3) и (5) получим:

$$P_H \left(\frac{\rho_k}{\rho_n}\right)^n = \left[Q_v - \frac{D^2}{2 \cdot (n^2 - 1)} \right] \cdot \rho_k \cdot (k - 1) \quad (6)$$

Учитывая то, что давление детонации равно $P_H = \frac{\rho_{BB} D^2}{n+1}$,

окончательно получим:

$$\rho_k^{(n-1)} = \frac{\left[Q_v - \frac{D^2}{2 \cdot (n^2 - 1)} \right] \cdot \left(\frac{n+1}{n} \right)^n \cdot (n+1) \cdot (k-1) \cdot \rho_{BB}^{(n-1)}}{D^2} \quad (7)$$

Решая уравнение (7) находим ρ_k , значение которого подставляем в уравнение (4) и получаем величину давления продуктов взрыва в точке сопряжения:

$$\rho_k = \frac{\rho_{BB} \cdot D^2}{n+1} \cdot \left[\frac{n \rho_k}{(n+1) \cdot \rho_{BB}} \right]^n \quad (8)$$

Уравнения (3) и (8) показывают от каких параметров ВВ зависят величины $\left(\frac{V_K}{V_H} \right)$, P_H , P_K . Действительно, если производить взрывание одного и того же заряда ВВ в строго определенных условиях, с постоянным значением $P_{[\sigma]}$, например в канале бомбы Трауцля, то получается, что конечный объем, характеризующий расширение канала бомбы, определяется уравнением:

$$V_K = V_H \cdot \left[\left(\frac{P_H}{P_K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{P_K}{P_{[\sigma]}} \right)^{\frac{1}{k}} \right].$$

Так как величины P_H и $P_{[\sigma]}$ постоянны, то величина V_K зависит от V_H и P_K . Начальный объем зависит от массы ВВ и плотности его заряжания. Величина P_K , согласно уравнению (3), имеет гораздо более сложную зависимость. В работе [3] показано, что в канале свинцовой бомбы ВВ с гидрозабойкой дают больший объем его расширения, нежели в аналогичных условиях с песчаной неуплотненной забойкой. При этом увеличение объема канала свинцовой бомбы равноценно увеличению удельной теплоты взрыва ВВ в среднем на 10%. Для ВВ с отрицательным кислородным балансом в принципе возможно увеличение теплоты

взрыва за счет снижения константы равновесия реакций генераторного газа в сторону образования углекислого газа и паров воды. Для ВВ с нулевым и положительным кислородным балансом (нитрогликоль, нитроглицерин, нитроманит и др.) увеличение их теплоты взрыва, вследствие чего произошло увеличение расширения канала свинцовой бомбы при взрывании с гидрозабойкой, пока не нашло объяснения. Покажем это на примере. Для нитроглицерина имеем: $D=7780$ м/с; $\rho_{BB}=1600$ кг/м³; $Q_v=6334,6$ кДж/кг; $n=2,83$; $k=1,2$; $V_H=6,25$ см³. Для свинца, из которого изготовлена бомба Трауця, примем предел прочности $P[\sigma]$ равный пределу прочности на сдвиг - τ_S , для которого вдоль радиуса расширения выполняется условие Треска-Мизеса:

$$\sigma_S - \sigma_o = 2 \cdot \tau_S,$$

где σ_S, σ_o - компоненты тензора напряжений.

Примем для свинца, согласно работе [7], $\sigma_S=1,12 \cdot 10^7$ Па.

Тогда $\sigma_S \approx 5,6 \cdot 10^6$ Па. По уравнению (7) находим ρ_k , по уравнению (8) P_K , а по уравнению (1) $\frac{V_K}{V_H}$:

$$\rho_K = \left\{ \frac{\left[6334576 - \frac{60528400}{2 \cdot (8,01 - 1)} \right] \cdot \left(\frac{2,83 + 1}{2,83} \right)^{2,83} \cdot (2,83 + 1) \cdot (1,2 - 1) \cdot \rho_{BB}^{2,83 - 1}}{60528400} \right\}^{\frac{1}{2,83 - 1}} =$$

$$= 344,07 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$P_K = \frac{1600 \cdot 7780^2}{2,83 + 1} \cdot \left(\frac{2,83 \cdot 344,07}{1600 \cdot 3,83} \right)^{2,83} = 1,387 \cdot 10^8 \text{ Па};$$

$$\frac{V_K}{V_H} = \left(\frac{2,529 \cdot 10^{10}}{1,387 \cdot 10^8} \right)^{\frac{1}{2,83}} \cdot \left(\frac{1,387 \cdot 10^8}{5,6 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,2}} \approx 91,2.$$

Расширение канала свинцовой бомбы $\Delta V=91,2 \cdot 6,25=573,75$ см³. Фактические значения $\Delta V=525 \dots 550$ см³. Таким

образом предложенная модель разрушения массива хорошо согласуется с опытными данными, полученными в свинцовой бомбе Трауцля. Вместе с тем при взрывании нитроглицерина с гидрозабойкой расширение канала свинцовой бомбы составляет около 600 см^3 , что равноценно увеличению его удельной теплоты взрыва на 10%. В данном случае прирост увеличения расширения канала свинцовой бомбы связан со спецификой протекания взрывного процесса в окружении воды.

Рассмотрим процесс расширения в жидкости продуктов реальной детонации ВВ. В основе рассмотрим задачу о расширении сферы продуктов детонации в воде, приведенную Ф.А. Баумом в работе [8].

Для сферической волны в не сжимаемой жидкости основные уравнения гидродинамики имеют вид:

$$\frac{du}{dt} + u \cdot \frac{du}{dr} + \frac{1}{\rho_e} \cdot \frac{dp}{dr} = 0; \quad \frac{du}{du} + \frac{2u}{r} = 0 \quad (9)$$

и допускают следующее общее решение:

$$ur^2 = f(t); \quad \frac{P_e - \varphi(t)}{\rho_e} = \frac{df}{rdt} - \frac{f^2}{2r^4}, \quad (10)$$

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

P_e, ρ_e – давление и плотность воды. При этом закон движения границы раздела между продуктами детонации и водой можно записать в виде:

$$P_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^{3n} = P_e + \rho_e \cdot \left[\frac{df}{rdt} - \frac{f^2}{2r^4} \right], \quad (11)$$

причем на границе раздела

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

С учетом этого уравнение (11) принимает вид:

$$\frac{du^2}{dr} + 3 \frac{u^2}{r} = \frac{2P_1}{\rho_e} \cdot \frac{r_1^{3n}}{r^{3(n+1)}} - \frac{2P_e}{\rho_e r}. \quad (12)$$

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, имеет вид:

$$u^2 = \left(u_1^2 + \frac{2}{3 \cdot (n-1)} \cdot \frac{P_1}{\rho_g} + \frac{2P_g}{3\rho_g} \right) \cdot \left(\frac{r_1}{r} \right)^3 - \left[\frac{2P_1}{3 \cdot (n-1) \cdot \rho_g} \cdot \left(\frac{r_1}{r} \right)^{3n} + \frac{2P_g}{3\rho_g} \right]. \quad (13)$$

Принимая во внимание, что продукты детонации в момент удара о воду тормозятся, предельное расстояние, которое они достигают можно определить из уравнения (13), полагая в нем, что $U=0$ – продукты детонации заторможены, $U_1=U_g$ – вода приобретает скорость потока, уравновешивающего остаточное давление продуктов детонации в полости – $\rho_g U_g^2 = P_K = P_B$. Тогда при условии, что $P_1 = P_H$, а $r_1 = r_{BB}$, получим:

$$\frac{P_H}{n-1} \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^{3n} + P_K = \left(\frac{3}{2} \cdot P_K + P_K + \frac{P_H}{(n-1)} \right) \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^3. \quad (14)$$

Раскрываем скобки, делим обе части на P_K и получаем:

$$\frac{P_H}{(n-1) \cdot P_K} \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^{3n} + 1 = 2,5 \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^3 + \frac{P_H}{(n-1) \cdot P_K} \cdot \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^3 \quad (15)$$

Окончательно уравнение (15) преобразуем к виду:

$$\left(\frac{r}{r_{BB}} \right)^{3n} = 2,5 + \frac{P_H}{(n-1) \cdot P_K} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^n \right]. \quad (16)$$

Принимая во внимание, что $r_{BB} \ll r$, а $n \approx 3$, то $\left[1 - \left(\frac{r_{BB}}{r} \right)^4 \right] \approx 1$, т.е. мало отличается от единицы. Тогда окончательно получим:

$$P_K = \frac{P_H}{2 \cdot \left[\left(\frac{r}{r_{BB}} \right)^3 - 2,5 \right]} \quad (17)$$

Из уравнения (17) следует, что давлению воды, подвергнутой ударному действию продуктов детонации ВВ, соответствует давление P_K , которое резко снижается с расстоянием r . Однако

при $\left(\frac{r}{r_{BB}}\right)^{3n} = 3,5$ давление воды в окрестностях заряда ВВ будет

всего в 2 раза ниже чем во фронте детонационной волны P_H . При этом радиус ударного воздействия в воде составит $1,52r_{BB}$. Вода будет иметь давление равное давлению продуктов детонации в полости P_K . Плотность продуктов детонации в момент торможе-

ния в воде составит $\rho_K = \frac{n+1}{n} \cdot \rho_{BB} \cdot \left(\frac{P_K}{P_H}\right)^{\frac{1}{n}}$. Для нитроглицерина

на в условии его гидровзрывания радиус ударного воздействия на воду составит $1,52r_{BB}$, давление в полости $P_K(r) = \frac{P_H}{2}$, плотность

продуктов детонации $\rho_K = \frac{2,83+1}{2,83} \cdot 1600 \cdot (0,5)^{0,353} \approx 1695 \text{ кг/м}^3$,

т.е. выше, чем исходная плотность ВВ в заряде.

Под действием такого давления продуктов детонации ВВ вода сжимается. В настоящее время известно уравнение состояния воды для области высоких давлений в воде [9]:

$$P_c - P_o = d \cdot (\rho_c^K - \rho_o^K),$$

где P_c и P_o – соответственно давление сжатой воды и ее начальное давление;

ρ_c и ρ_o – соответственно плотность сжатой воды и ее начальная плотность, г/см^3 ;

d, K – коэффициенты, равные $d=4250$, $K=6,29$ соответственно.

Для условий гидровзрывания нитроглицерина плотность сжатой воды получим:

$$\frac{248000}{2 \cdot 4250} + 1 = \rho_c^{6,29}; \rho_c = (30,2)^{0,159} \approx 1700 \text{ кг/м}^3.$$

Таким образом, плотность продуктов детонации и ударно-сжатой воды практически равны. Полученный результат полностью раскрывает эффект гидровзрывания ВВ. При этом, при детонации заряда ВВ в воде вокруг него образуется область ударно-сжатой воды и продуктов детонации, которая имеет объем в 3,5 раза больше чем исходный заряд ВВ. В этой области устанавли-

вається давление равное половине давления детонации ВВ. Вследствие чего начальный объем V_H при гидровзрывании ВВ возрастает в 3,5 раза, тогда как давление в этом объеме снижается всего в 2 раза. Если обратиться к конкретному примеру, например, для нитроглицерина, то согласно уравнению (1) получим, что эффект при гидровзрывании составит

$$\frac{V_K^G}{V_K} = \frac{3,5 \cdot V_K}{V_H} \cdot \left(\frac{P_K}{P_H} \right)^{0,3533} \approx 3,5 \cdot 0,783 = 2,74 \text{ раза по отношению к}$$

взрыванию без окружения заряда водой.

Сопоставление указанного результата можно осуществить и в условиях взрывания нитроглицерина в бомбе Трауцля с гидрозабойкой. В этом случае область сжатой воды будет гораздо меньше. Приведенный радиус заряда нитроглицерина $r_{BB}=1,143$ см. Следовательно, радиус ударно-сжатой воды составит $r_g = 1,52 \cdot 1,143 \approx 1,74$ см. Так как вода контактирует только в канале бомбы, то ее объем примерно будет равен $V_g \approx 0,785 \cdot d_g^2 \cdot (1,74 - 1,143) \approx 2,944 \text{ см}^3$, а общий объем сжатых продуктов детонации и воды составит $V_H^G = 6,25 + 2,944 \approx 9,2 \text{ см}^3$. Давление $P_K = \frac{P_H}{2} = 1,264 \cdot 10^{10}$ Па. Согласно уравнению (1), получим:

$$V_K^G = V_H^G \cdot \left(\frac{1,264 \cdot 10^{10}}{1,387 \cdot 10^8} \right)^{\frac{1}{2,83}} \cdot \left(\frac{1,387 \cdot 10^8}{5,6 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,2}} = 9,2 \cdot 4,925 \cdot 14,49 \approx 656 \text{ см}^3$$

Приращение объема канала бомбы $\Delta V = 656 - 32 = 624 \text{ см}^3$, что практически совпадает с экспериментом ($\Delta V = 600 \text{ см}^3$).

Несомненный практический интерес представляет приложение полученных результатов к обоснованию эффективности действия на массив донно-устьевой гидрозабойки. С этой целью были проведены эксперименты по определению разрушающего действия ударно-сжатой воды, которая находится в забойке и непосредственно контактирует с зарядом ВВ на массив. Вода заливалась в стальную трубу с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенок 1,5 мм. С торца помещался заряд из аммонита Т-19

массой 40 г и плотностью $\rho_{BB} = 1000 \text{ кг/м}^3$. Приведенный радиус заряда 2,12 см. В соответствии с уравнением (17) радиус ударно-сжатой воды $r_{у.ж.} = r_{BB} \cdot 1,52 = 3,22$ см. Давление детонации Т-19 в указанном диаметре заряда $P_H \approx 5,00 \cdot 10^9$ Па.

Давление ударно-сжатой воды $P_K = \frac{P_H}{2} \approx 2,5 \cdot 10^9$ Па. Согласно [7], предел прочности стали на сдвиг $\tau_S = 2,7 \cdot 10^8$ Па. Поскольку $\tau_S > P_{ПВ}$, то второй фазой расширения газообразных продуктов взрыва можно пренебречь. Тогда согласно уравнению (1) получим максимальный объем расширения трубы при взрыве ВВ с гидрозабойкой равный:

$$V_K = V_H \cdot \left(\frac{P_K}{\tau_S} \right)^{0,4545} = 147,3 \text{ см}^3,$$

а радиус разрушения равен $r_{разр} \approx 3,3$ см.

В эксперименте после взрывания заряда ВВ измеряли периметр трубы – П, по которому рассчитывали изменение радиуса трубы:

$$\Delta r_{mp} = \frac{П_1 - П_0}{2\pi}.$$

Изменение радиуса трубы после взрыва ВВ с гидрозабойкой по длине трубы - L хорошо описывается уравнением регрессии вида $\Delta r = 5,2291 \exp[-0,0541L]$, где Δr – изменение радиуса трубы, мм; L – длина трубы, мм. Коэффициент корреляции $z = -0,979$. На рис. 1 приведены схема и результаты опытов, а также вычисленные значения Δr для $L = 0$ ($r_{зар.}$ контактирует с водой при $L=0$) и $r_{у.ж.}$ ($L=13$ мм). Обе точки достаточно хорошо легли на кривую изменения радиуса трубы от длины L . Вместе с тем необходимо отметить, что при $r_{у.ж.} = r_{разр.}$ разрушение трубы не заканчивается, хотя радиус раздутия быстро уменьшается. Это говорит о том, что движущийся поток воды имеет напор, достаточный для осуществления значительной деформации трубы. Поэтому фазу гидроудара также необходимо учитывать при гидро-взрывании ВВ.

4. Проведены экспериментальные исследования взрывания зарядов ВВ при контакте с гидрозабойкой, расположенной в металлических трубах. Получено эмпирическое уравнение, описывающее приращение радиуса разрушения трубы от длины гидрозабойки. Теоретические и экспериментальные результаты имеют хорошее совпадение при длинах забойки равных - $r_{\text{разр.}}$, определяемого из параметров ударно-сжатой воды.

Вместе с тем отмечено, что при длине гидрозабойки, превышающей $r_{\text{разр.}}$, разрушение трубы имеет место и, по-видимому, связано с гидроударом движущегося потока жидкости, который необходимо учитывать при разрушении горного массива.

Дальнейшие работы необходимо проводить в направлении по разработке конструкций гидрозабойки, позволяющей получить оптимальные параметры разрушения горного массива.

Перечень ссылок

1. Шевцов Н.Р., Лабинский К.Н., Калякин С.А. Основы теории гидровзрывания при разрушении пород // Проблеми гірського тиску. Випуск 7 / Під заг. ред. О.А. Мінаєва. – Донецьк, ДонНТУ, 2002. – С. 59-84.
2. Шевцов Н.Р., Лабинский К.Н., Калякин С.А. Обоснование эффективной длины донно-устьевой гидрозабойки // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірничо-геологічна. Випуск 54. – Донецьк, ДонНТУ, 2002. – С. 115-122.
3. Калякин С.А., Шевцов Н.Р. Влияние условий гидровзрывания на энергетические показатели и работоспособность взрывчатых веществ // Проблеми гірського тиску. Випуск 8 / Під заг. ред. О.А. Мінаєва. – Донецьк, ДонНТУ, 2002. – С. 116-144.
4. Баум Ф.А. Процессы разрушения горных пород взрывом: Сб. «Взрывное дело», № 52/9. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 262-272.
5. Зельдович Д.Б., Компанеец А.С. Теория детонации. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 268 с.

6. Ландау Л.Д., Станюкович К.П. Об изучении детонации конденсированных и газовых систем. – М.: Наука, 1986. – С. 28-32.
7. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980. – 455 с.
8. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1954. – 800 с.