

Чл.-корр. НАН Украины Э.И. Ефремов,
канд. техн. наук В.А. Никифорова
(ИГТМ НАН Украины),
В.В. Баранник (ОАО "Докучаевский
флюсо-доломитный комбинат")

О МЕХАНИЗМЕ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБВОДНЕННЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД

Наведено теоретичне обґрунтування механізму вибухового руйнування обводнених середовищ і результати експериментальних досліджень, що його підтверджують.

ABOUT BLASTED BREAKING MECHANISM OF THE WATER SATURATED SOLID MEDIUMS

The blasted breaking mechanism of the water saturated solid mediums and the results of the corroborated experimental researches are adduced.

С увеличением глубины разработки полезных ископаемых возрастает доля обводненных горных пород, характер дробления которых существенно меняется вследствие изменения физико-механических свойств пород при водонаполнении и механизма взрывного воздействия на обводненную среду.

Представления о механизме действия взрыва в сухой необводненной твердой среде общеизвестны [1, 2]. В результате взрывчатого превращения взрывчатого вещества (ВВ) с выделением тепла и образованием газов в зарядной полости скачкообразно повышается давление газов взрыва. Вследствие этого в окружающей среде во все стороны распространяется однократная ударная волна. На контакте заряда со средой скачок давления, преодолевая сопротивление среды всестороннему сжатию, производит ее раздавливание и измельчение, увеличивая при этом размеры зарядной полости. На расстоянии двух-трех радиусов заряда напряжения в ударной волне становятся меньше предела прочности породы на раздавливание, и ударная волна переходит в волну напряжений, распространяющуюся со скоростью, равной скорости распространения звука в этой среде. Волна напряжения обуславливает радиальное сжатие слоев среды, возникновение тангенциальных напряжений и образование радиальных трещин.

На стадии возникновения ударной волны и увеличения объема зарядной полости давление газов взрыва несколько снижается, но остается еще достаточно высоким и действует на стенки полости и трещин, образованных волной. Поскольку время действия газообразных продуктов взрыва на среду на порядок больше времени прохождения волны, их действие можно считать вторичным во времени и рассматривать как квазистатическое.

Таким образом, при взрыве в твердой среде и отсутствии воды на контакте ВВ со стенками зарядной полости, ударная волна, возникающая при детонации ВВ, вызывает измельчение и уплотнение среды вокруг исходной зарядной полости, что приводит к увеличению ее размеров.

Характер изменения объема зарядной полости во времени иллюстрирует рис. 1 [3]. На контакте ВВ со стенками зарядной полости под действием ударной волны за время, определяемое свойствами ВВ и среды, объем зарядной полости удваивается по сравнению с исходным ее объемом. В течение времени $t = 4\tau$ удвоенный объем зарядной полости сохраняется. Это свидетельствует о том, что после воздействия на среду ударной волны, дальнейшее проникновение газообразных продуктов детонации в среду еще не началось.

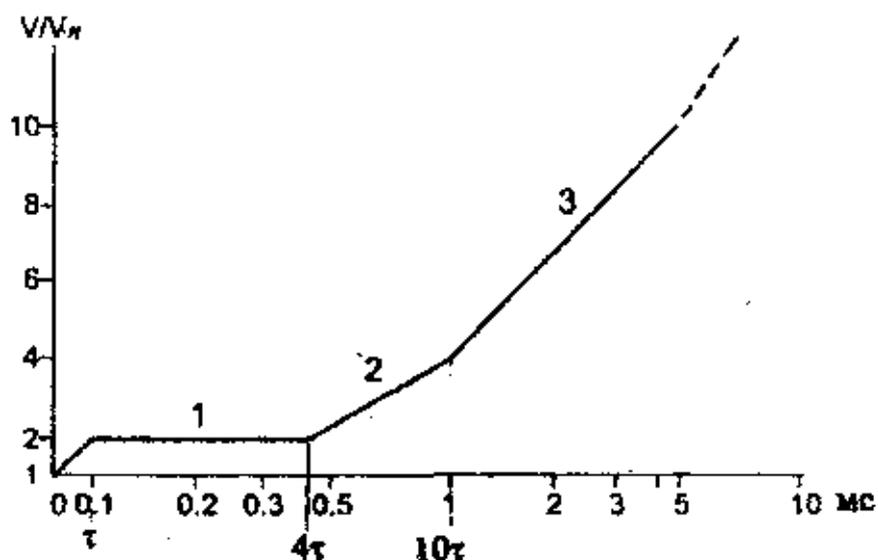


Рис. 1 - Увеличение размеров зарядной полости в необводненной (сухой) среде во времени

При проникновении газообразных продуктов детонации в образованные волной трещины за время $(4-10)\tau$ объем зарядной полости увеличивается в четыре раза, а за период времени $(10-50)\tau$ – в десять раз [3].

Предположим, что удвоение объема зарядной полости произошло при взрыве цилиндрического заряда ВВ. При условии, если увеличение линейных размеров полости произошло одинаково по всем направлениям, можно записать

$$K^3 r_0^2 h_0 = 2r_0^2 h_0, \quad (1)$$

где r_0, h_0 – исходные размеры цилиндрической зарядной полости; K – коэффициент пропорциональности при увеличении объема зарядной полости. Как следует из (1), $K = 1,26$.

Таким образом, при удвоении объема цилиндрической зарядной полости ее радиус и высота увеличиваются в 1,26 раза.

Если, в соответствии с [4], на этапе удвоения объема зарядной полости принять адиабатический закон расширения газообразных продуктов детонации с показателем адиабаты, равным 3, то

$$P = P_n \left(\frac{V_n}{V} \right)^3 \quad (2)$$

где $P_n = \frac{\rho_{BB} D^2}{8}$ – давление продуктов детонации на стенки исходной зарядной полости; ρ_{BB} и D – соответственно плотность и скорость детонации ВВ.

При удвоении объема зарядной полости за счет сжатия материала среды давление на стенки зарядной полости будет

$$P_n = \frac{\rho_{BB} D^2}{64}. \quad (3)$$

Таким образом, при удвоении объема зарядной полости давление газообразных продуктов детонации падает в 8 раз.

Если заряд ВВ размещается в водонасыщенной твердой среде, когда между стенками зарядной полости и зарядом ВВ возможно наличие водного зазора, то ударная волна, возникающая при детонации ВВ, сначала воздействует на водный промежуток, в котором она теряет часть своей энергии на нагревание, испарение и вытеснение воды. Затем ударная волна, испытав преломление на границе, переходит в твердую среду, в которой расположена зарядная полость. В результате этого давление на стенки зарядной полости в обводненной среде будет меньше, чем давление на контакте ВВ со стенками полости в сухой среде. Поэтому зона смятия среды на контакте с ВВ будет меньше и удвоения объема зарядной полости не произойдет.

Учитывая, что при рассмотрении процесса распространения ударных волн в плотных средах (воде или твердом теле) можно в большинстве случаев пренебрегать изменением энтропии и температуры среды и рассматривать ударную волну в акустическом приближении [5], произведем оценку снижения амплитуды ударной волны при переходе через водный промежуток (между ВВ и стенками зарядной полости) в акустическом приближении по формуле

$$K_{np} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad (4)$$

где K_{np} – коэффициент преломления при переходе ударной волны из первой среды во вторую; Z_1 и Z_2 – соответственно, акустические жесткости первой $Z_1 = \rho_1 c_1$, и второй среды $Z_2 = \rho_2 c_2$; ρ_1 и ρ_2 , c_1 и c_2 – соответственно плотности и скорости волн сжатия в первой и второй среде [6].

При переходе из воды с $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 1483 \text{ м/с}$, $Z_1 = 1483 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ в песчано-цементную смесь (материал модели) с $\rho_2 = 1925 \text{ кг/м}^3$, $c_2 = 2490 \text{ м/с}$,

$Z_2 = 4,793 \cdot 10^6$ кг/м²·с коэффициент преломления $K_{np} = 0,47$. Это значит, что после прохождения ударной волны через водный промежуток ее амплитуда уменьшится более чем в два раза, так что давление на стенки зарядной полости будет как минимум в два раза меньше, чем при контакте среды с ВВ.

Очевидно, что при таком падении давления продуктов детонации на стенки зарядной в обводненной среде такого же смятия и увеличения размеров полости, как в сухой среде не будет. По сравнению с взрывом в сухой среде наличие воды приводит к тому, что после прохождения ударной волны газообразные продукты детонации работают в зарядной полости меньшего размера и давление их будет выше, чем в сухих условиях.

С учетом различий в механизме взрывного разрушения сухих и обводненных твердых сред построены зависимости давления газообразных продуктов детонации от занимаемого ими объема, увеличивающегося при их проникновении в образованные волной напряжений трещины (квазистатическое действие взрыва).

Если приближенный закон расширения продуктов детонации взять в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} P = P_n \left(\frac{V_n}{V} \right)^3 \\ P = P_* \left(\frac{V_*}{V} \right)^{1,25} \end{array} \right. ; \quad (5)$$

$$, \quad (6)$$

считая, что за время действия ударной волны расширение зарядной полости происходит по закону (5), а при проникновении в среду газообразных продуктов детонации по закону (6). P_* , V_* – давление и объем зарядной полости в точке сопряжения адиабат.

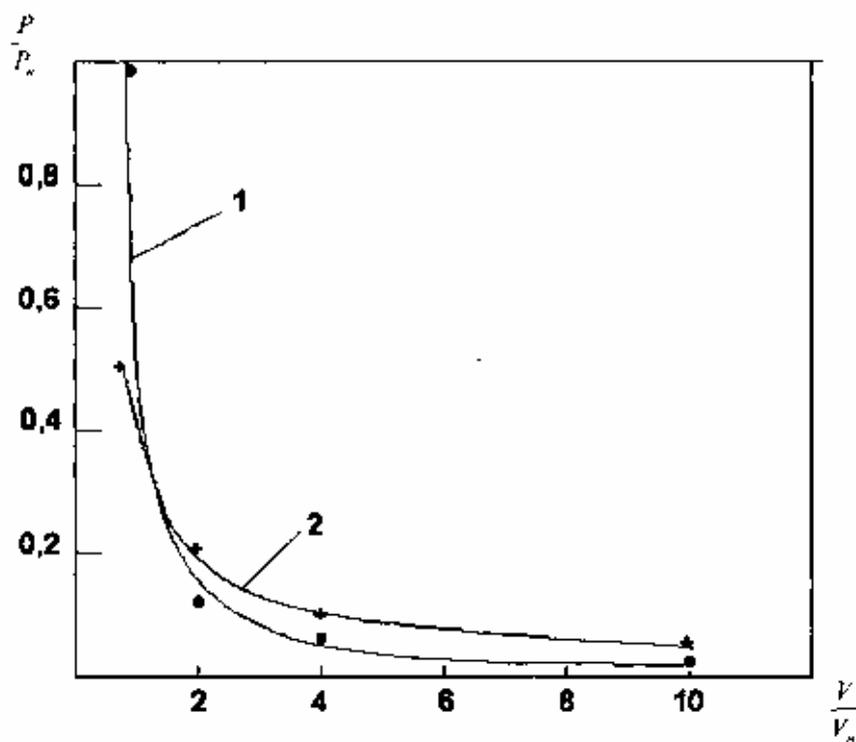
Предположим, что в сухой среде действие ударной волны заканчивается после удвоения объема зарядной полости, а в обводненной среде – после преломления через водный промежуток. Тогда при взрыве в сухой среде:

$$\begin{aligned} P(2V_n) &= 0,125P_n ; \\ P(4V_n) &= 0,125P_n \left(\frac{2V_n}{4V_n} \right)^{1,25} = 0,05P_n ; \\ P(10V_n) &= 0,05P_n \left(\frac{4V_n}{10V_n} \right)^{1,25} = 0,016P_n . \end{aligned} \quad (7)$$

При взрыве в обводненной среде:

$$\begin{aligned}
 P(2V_H) &= 0,05P_H \left(\frac{V_H}{2V_H} \right)^{1,25} = 0,21P_H ; \\
 P(4V_H) &= 0,21P_H \left(\frac{2V_H}{4V_H} \right)^{1,25} = 0,09P_H ; \\
 P(10V_H) &= 0,09P_H \left(\frac{4V_H}{10V_H} \right)^{1,25} = 0,03P_H .
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Результаты расчетов падения давления в зарядной полости при проникновении газообразных продуктов детонации в разрушаемую среду приведены на рис. 2.



1 – сухие условия; 2 – обводненные условия
 Рис. 2 – Характер падения давления в зарядной полости
 в зависимости от условий работы заряда

В необводненной среде давление непосредственно на стенки исходной зарядной полости в два раза больше, чем в обводненной.

Следовательно, размеры зоны переизмельчения и выход мелких фракций в сухой среде должны быть выше. Однако при проникновении газообразных продуктов детонации в среду давление на стенки эквивалентной зарядной полости с растущими трещинами в обводненных условиях выше, то есть в обводненных условиях усиливается квазистатическое действие взрыва. Поэтому в обводнен-

ных условиях может увеличиться объем отбитой взрывом среды.

Для проверки достоверности выводов, полученных на основе предлагаемого механизма действия взрыва в обводненной среде, были проведены экспериментальные исследования в полигонных условиях на песчано-цементных моделях. Модели изготавливались в форме цилиндров диаметром 270 мм и высотой 200 мм и предназначались для замера амплитуды волн напряжений от взрыва заряда ВВ и изучения характера дробления. При изготовлении моделей в них на расстоянии 50 мм от их оси формировались концентрические щели, а по оси моделей – цилиндрические зарядные полости диаметром 9 мм. Кроме того, при изготовлении моделей на расстояниях 40 и 65 мм от оси модели на уровне середины высоты заряда ВВ были установлены пьезоэлектрические измерительные преобразователи (датчики) из керамики цирконата-титаната свинца типа ЦТС-19. Датчики были установлены таким образом, что один располагался в материале модели до щели, а второй – за щелью (рис. 3). Чувствительность d_{33} измерительных преобразований определялась резонансным методом [7].

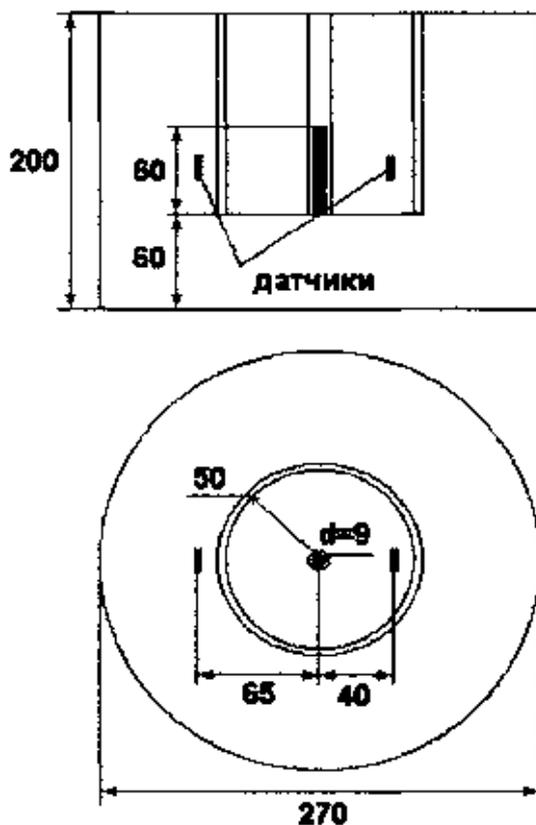


Рис.3 – Схема расположения датчиков относительно щели в моделях цилиндрической формы

В процессе экспериментов модели размещались в металлической взрывной камере и дистанционно подрывались. Для создания условий «обводненности» взрывная камера после размещения в ней модели заполнялась водой. При этом чтобы не допустить насыщения водой материала моделей, что повлекло бы за

собой изменение физико-механических свойств среды, воду в камеру наливали перед самым взрывом.

При взрыве зарядов ВВ в моделях механические напряжения в волне сжатия трансформировались датчиками в электрические сигналы и фиксировались записывающими осциллографами. Амплитудные значения сигналов U_{\max} на осциллографах соответствовали максимальным механическим напряжениям в волне сжатия.

Расчет механических напряжений, нормальных к поверхности датчика S_{∂} имеющего форму таблетки диаметром 8 мм и толщиной 0,36 мм, производился по формуле:

$$\sigma = \frac{CU_{\max}}{d_{33}S_{\partial}}, \quad (9)$$

где C – емкость измерительной системы.

Анализ рассчитанных напряжений в волне сжатия показывает, что напряжения, зафиксированные датчиками, расположенными до щели, практически не зависят от заполнителя щели (воздух или вода) и их величина составила $3,2 \div 3,5$ МПа. В то же время напряжения, фиксируемые датчиком за щелью с водой, почти в два раза выше напряжений за щелью с воздухом, соответственно 2,0 и 1,1 МПа. Это свидетельствует о большем экранировании волны напряжений щелью, заполненной воздухом.

В процессе эксперимента, наряду с замерами волн напряжений, нами методом ситового анализа исследовался характер дробления модели. Во всех случаях были разрушены только внутренние части моделей, ограниченные концентрическими щелями. В сухих моделях, при отрыве снизу от всей модели центральной ее части, наблюдалось одновременно два вида «стаканов». «Стаканы» первого вида диаметром, равным приблизительно 10 диаметрам заряда, образовались при вывале зоны переизмельчения, примыкающей к заряду ВВ. «Стаканы» второго вида были представлены неразрушенной исходной зарядной полостью.

В моделях с концентрической щелью, заполненной водой, отмечена ровная поверхность отрыва центральной части модели на уровне дна зарядной полости.

Результаты исследований характера дробления моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики дробления материала модели с концентрической щелью

Характеристики дробления	Щель с воздухом	Щель с водой
Масса разрушенной части модели	1780,0	2250,0
Масса фракций менее 5 мм, г	120,0	45,0
Выход фракций менее 5 мм, %	7,0	2,6
Диаметр среднего куска, мм	29,4	59,0

Из анализа данных табл.1 следует, что в моделях со щелью, заполненной во-

дой, масса, а, следовательно, и объем отбитой взрывом части модели в 1,3 раза больше, а количество мелких (менее 5 мм) фракций почти в три раза меньше, чем в моделях, в которых заполнителем щели является воздух. Диаметр среднего куска в обводненных моделях в два раза больше, чем в сухих моделях.

Таким образом, в необводненных моделях среда разрушается более интенсивно, чем в обводненных, однако в последних увеличивается общий объем отбитой взрывом среды.

И, хотя в обводненных моделях напряжения в волне за щелью почти в два раза выше, чем в сухих моделях, они, как показано экспериментом, являются недостаточными для разрушения среды за щелью. Увеличение объема, отбиваемого взрывом, в обводненных условиях может быть объяснено увеличением квазистатического действия газообразных продуктов детонации при их проникновении в среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника и технология взрывных работ // Под общей ред. Г.П.Демидюка. – М.: Недра, 1978. – 239 с.
2. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. – М.: Недра, 1974. – 223 с.
3. Rock excavation handbook for civil engineering // Sandvic Tamrock Corp., 1999. – 364 p.
4. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. – 262 с.
5. Станюкович К.Н. Неустановившиеся движения сплошной среды. – М.: Наука, 1971. – 854 с.
6. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф., Цирель С.В. Закономерности затухания волн напряжений при прохождении через обводненный трещиноватый массив // Взрывное дело № 90/47. – М.: Недра, 1990. – С.110-122.
7. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Баранник В.В. и др. Экспериментальные исследования процесса взрывного разрушения обводненных твердых сред // Науковий вісник НГУ. – 2003.– № 2. – С.3-6.