

УДК 622.233:622.236

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГИДРОВЗРЫВАНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПОРОД

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

*Викладені основні положення розробленої теорії руйнування гірничих порід гідровисадженням. Надано результати експериментального її підтвердження. Виділені найбільш ефективні напрямки підвищення ефективності вибухових робіт.*

*In the article you can find the main theses of the worked out theory of distruction of mining rocks by means of hydroexplosion. The results of its experimental confirmation was giving here. The most effective ways of increasing the efficiency of explosive works was underline in that work.*

Развитие угольной промышленности Украины происходит в условиях непрерывного роста глубины разработки и газообильности шахт. В результате этого условия добычи угля и проведения горных выработок становятся все более сложными и опасными. Поэтому первостепенную важность имеют работы, направленные на разработку и внедрение передовых эффективных и безопасных технологий добычи угля и проведения горных выработок.

Одной из таких технологий разрушения горного массива является гидровзрывание. Гидровзрывание имеет ряд преимуществ по сравнению с обычным взрыванием на угольных шахтах, разрабатывающих пласты, опасные по внезапным выбросам угля и газа, т.к. при его осуществлении резко повышается эффективность взрыва: увеличивается коэффициент использования шпуров (КИШ); снижается удельный расход ВВ; одновременно при этом резко снижается пылеобразование и выделение в шахтную атмосферу ядовитых газов взрыва и газов,

образующихся при разрушении горного массива, а, следовательно, снижается вероятность взрыва метана и угольной пыли, а также внезапного выброса угля и газа.

Не смотря на высокую эффективность и безопасность гидровзрывания, этот способ разрушения горного массива широкого промышленного распространения не получил. Основными причинами, препятствующими его внедрению являются отсутствие промышленных взрывчатых материалов, способных находиться в воде под ее избыточным давлением, а также отсутствием каких-либо закономерностей, описывающих механизм гидровзрывания, и вытекающих из них зависимостей, позволяющих оценить эффективность действия взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) в горной породе, а также рассчитать паспорт буровзрывных работ (БВР), т.е. разработать конструкцию заряда, определить число шпуров на забой и рассчитать схему их размещения. Поэтому, чтобы обойти трудности расчета гидровзрывания, данный способ свели в настоящее время к применению гидрозабойки шпуров. Вместе с тем, механизм поведения гидрозабойки в шпуре при взрыве до сих пор недостаточно ясен, как и сам механизм гидровзрывания.

Не смотря на значительное количество работ, посвященных изучению физических процессов при взрыве ВВ в воде [1;2;3], исследований, рассматривающих процессы разрушения горных пород при гидровзрывании нет. Отсутствие единого подхода его оценки привело к тому, что одни считают, что эффективность гидровзрывания объясняется прежде всего тем, что при взрыве заряда ВВ в шпуре, заполненном водой, образуется гидроудар, который воздействует не только на стенки шпура, но и на стенки всех трещин, сообщающихся с ним и заполненных водой. Это обстоятельство приводит, по их мнению, к увеличению радиуса воздействия взрывного давления на массив, а, следовательно, и к увеличению зоны взрывного разрушения массива [4]. Другие рассматривали действие взрыва ВВ в воде как сжатие жидкости продуктами взрыва, которая при своем движении расширяется и отдает часть энергии сжатия на дополнительное разрушение горной среды, повышая тем самым эффект взрыва [5]. Известные

ученые в области взрывного дела Г.И. Покровский, Н.В. Мельников, О.Б. Власов, А.Н. Ханукаев достаточно полно рассматривали воздействие взрыва на окружающую заряд ВВ породу. Оно состоит в следующем. Почти мгновенно образовавшиеся продукты детонации ВВ производят удар на окружающую среду, вызывая в ней концентрически распространяющиеся волны. Вследствие колоссального давления во фронте ударной волны вокруг зарядной камеры образуется зона остаточных деформаций, обусловленная сжатием среды и последующим ее растяжением за счет упруго-обратимой энергии сжатой среды. Упругий импульс от камеры взрыва распространяется в виде поперечных и продольных волн, разрушающее действие которых обусловлено возникающими касательными (тангенциальными) напряжениями:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  – напряжение сжатия во фронте ударной волны;

$\sigma_2$  – напряжение сжатия перед фронтом ударной волны.

Таким образом, вместе с ударными волнами (волны сжатия) должны двигаться волны касательных напряжений, абсолютные величины которых не зависят от абсолютного значения нормальных напряжений, но наибольшая величина их может быть равна только половине величины нормального напряжения. Так как сопротивление горных пород сдвигу примерно в 20 раз ниже сопротивления сжатию, то касательные напряжения становятся причиной их разрушения.

Тогда, приняв  $\tau$  равным временному сопротивлению породы скалыванию, можно определить  $\sigma_1$ , при котором начинается разрушение. В результате получим радиус раствора воронки выброса ( $r_g$ ) на свободной (открытой) поверхности:

$$r_g = \sqrt{r_\sigma^2 - w^2}, \quad (2)$$

где  $r_g$  – радиус, соответствующий напряжению сжатия  $\sigma_1$ , при котором происходит разрушение породы ударной волной;  
 $w$  – глубина заложения заряда ВВ (линия наименьшего сопротивления).

Как известно, показатель действия взрыва характеризует параметр "n", равный

$$n = \frac{r_g}{w}. \quad (3)$$

Приняв  $\sigma_2=0$ , получим:

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{100f}{k_1}, \quad (4)$$

где  $k_1$  – коэффициент, показывающий во сколько раз сопротивление сдвигу меньше сопротивления на сжатие данной породы;

$f$  – коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова.

При  $k_1 \approx 20$  получим:

$$\sigma_1 \approx 10f. \quad (5)$$

Давление продуктов детонации ВВ на стенку взрывной камеры в момент взрыва равно

$$P_g = 4\pi r_0^2 P_{cp}, \quad (6)$$

где  $P_{cp}$  – среднее давление продуктов детонации в зарядной камере;

$r_0$  – радиус заряда ВВ.

Полагая, что передача напряжения сжатия ударной волной произошла без потерь энергии, получим:

$$P_g = P_r = 4\pi r_\sigma^2 \sigma_1 = 4\pi r_0^2 P_{cp}$$

или

$$r_0^2 = r_\sigma^2 \frac{\sigma_1}{P_{cp}}.$$

Из уравнения (2) имеем

$$r_\sigma = \sqrt{r_\sigma^2 + w^2},$$

тогда

$$r_0 = w\sqrt{n^2 + 1} \sqrt{\frac{10f}{P_{cp}}}. \quad (7)$$

При гидровзрывании процесс разрушения горных пород не изменяется, однако изменяется как характер, так и сам механизм перераспределения давления продуктов детонации во взрывной камере. Действительно, в уравнении (6) величина  $P_{cp}$  равна среднему давлению продуктов детонации, которое может значительно отличаться от давления детонации ВВ ( $P_n$ ). Это отличие, с одной стороны, обусловлено размерами взрывной камеры, массой и диаметром заряда, плотностью ВВ в заряде, а с другой – свойствами применяемых ВВ, а также их энергетическими и детонационными показателями. Необходимо также обратить внимание на тот факт, что при гидровзрывании резко ограничивается разлет продуктов взрыва ВВ, вследствие чего удельный импульс взрыва возрастает. В этом случае Ф.А. Баум [6] рассматривает процесс разрушения как следствие необратимых деформаций слоев породы под действием взрывного импульса при условии:

$$I_{ВВ} \geq I_{кр}, \quad (8)$$

где  $I_{ВВ}$  – величина удельного импульса, передаваемая при взрыве ВВ породе;

$I_{кр}$  – критическое значение удельного импульса, зависящее от прочностных свойств породы.

При гидровзрывании эффективность ударной волны зависит от импульса в значительно большей степени, чем от точной

формы изменения давления с течением времени. По классическому определению удельный импульс равен:

$$I(t) = \int_0^t P(t) dt. \quad (9)$$

Форма ударной волны при взрывании такова, что интеграл (9) при возрастании времени  $t$  не сходится быстро к своему предельному значению. Это связано с тем, что хвостовая часть ударной волны (за ее пиком) затухает очень медленно, вызывая непрерывное увеличение величины интеграла  $I(t)$ . Причиной этого является существование вокруг газовой полости продуктов детонации интенсивного движения несжимаемой жидкости, давление в которой зависит как от ее гидростатического давления, так и от давления в газовой сфере (рис. 1). Поэтому при высоких гидростатических давлениях величина интеграла  $I(t)$  может быть очень большой, так как время воздействия  $t$  достигает величины порядка двухсоткратного значения начальной постоянной времени волны ( $\Theta$ ).

Давление в ударной волне  $P$  в функции времени  $t$  от начального давления  $P_m$  определяется выражением:

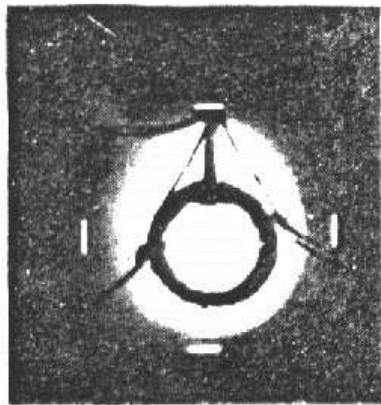
$$P = P_m e^{-t/\theta}, \quad (10)$$

Пиковое давление  $P_m$  во фронте ударной волны может быть выражено в виде:

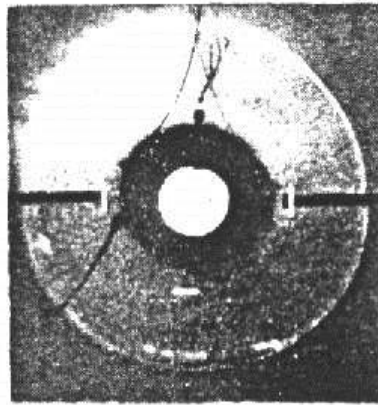
$$P_m = f\left(\frac{a_0}{r}\right),$$

т.е. зависит от размеров заряда  $a_0$  и расстояния  $r$ . Форма функции  $f$  подлежит определению для каждого типа ВВ. Поскольку это неудобно, гораздо проще получить связь между начальным пиковым давлением  $P_m$  и давлением детонации ВВ  $P_n$ .

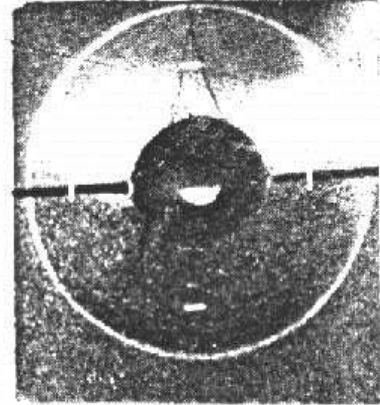
В монографии [2] Ф.А. Баум решал подобную задачу, приняв закон движения границы раздела слоя продуктов детонации ВВ и сжимаемой плотной преграды в виде степенной зависимости:



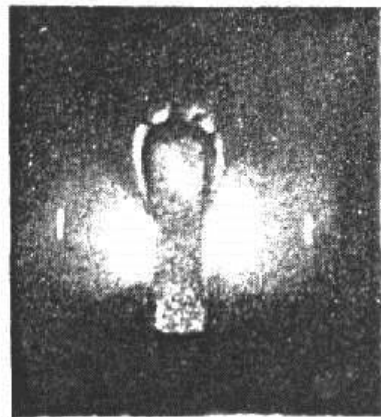
13  
а



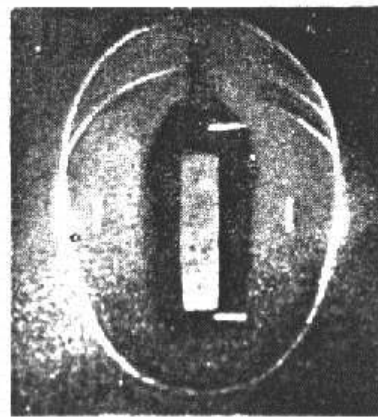
58  
б



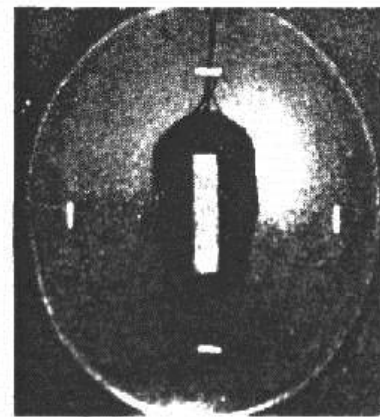
104  
в



10  
г



54  
д



101  
е

Рис. 1. Интенсивное движение несжимаемой жидкости вокруг газовой полости продуктов детонации

$$\omega = \omega_0 \left( \frac{x}{Dt} \right)^\beta, \quad (11)$$

где  $\omega_0 = \frac{U_0}{D}$ ,  $\omega = \frac{U}{D}$ ,  $U_0$  – начальная скорость границы раздела;

$\beta$  – некоторая константа, определяемая свойствами заряда ВВ и жидкой преграды;

$D$  – скорость детонации ВВ;

Величина  $\beta$  определяется выражением:

$$\beta = 1 + 0,02(\rho_0 C_0)^{0,24},$$

где  $C_0^2 = \left( \frac{dP}{d\rho_0} \right)$  – скорость звука в материале преграды при

$$P = P_m;$$

$\rho_0$  – начальная плотность материала преграды

$[\rho_0 C_0]$  – в кг/с\*м<sup>2</sup>.

Зависимость (11) позволяет получить аналитическое уравнение для определения давления на границе «продукт детонации ВВ – вода» с учетом сжимаемости последней. Дифференцируя уравнение (11) и производя математические преобразования, с которыми можно познакомиться в [2], было получено уравнение для определения  $P_m$  для сжимаемой жидкости ( $\omega_0 > 0$ ) в момент выхода фронта детонационной волны на поверхность контакта «ВВ – преграда»:

$$P_m = \frac{64}{27} P_n (1 - \omega_0)^3. \quad (12)$$

Величина  $\omega_0$  определяется экспериментально методом «аквариума» по известной ударной адиабате воды.

Величина импульса для любого момента времени  $\left( t > \frac{a_0}{D} \right)$  определяется интегралом:

$$I = \int_{\frac{a_0}{D}}^t P_n \frac{64}{27} \left( \frac{a_0}{Dt} \right)^3 \frac{(1 - \omega_0)^3 dt}{\left\{ 1 - \omega_0 \left[ 1 - \left( \frac{a_0}{Dt} \right)^{\beta-1} \right] \right\}^{3\beta/\beta-1}}. \quad (13)$$

Полученные выводы были экспериментально проверены при взрывании зарядов ВВ в воде. Первая серия экспериментов была проведена с целью определения каким образом влияет гидровзрывание на эффект взрыва. При этом в качестве критерия взрыва была принята дробящая способность заряда ВВ. Были поставлены специальные опыты, в которых при взрыве заряда



продукты детонации ВВ действовали на расположенный по образующей заряда свинцовый столбик аналогично, как в пробе на бризантность (проба Гесса). Результаты этих опытов приведены в табл. 1 ( $h_n$  – исходная высота свинцового столбика;  $h_k$  – высота столбика после взрывания;  $\Delta h$  - величина обжатия столбика).

Табл. 1.

Обжатие свинцовых цилиндров при взрыве ВВ в зависимости от условий взрывания.

Тип ВВ	Скорость детонации, м/с	Линейная плотность ВВ, кг/м	Линейная концентрация энергии, кДж/м	Условия взрывания	Обжатие свинцового столбика, $10^{-2}$ м		
					$h_n$	$h_k$	$\Delta h$
1	2	3	4	5	6	7	8
Аммонит 6ЖВ	4400	1,02	4370,1	В трубе без забойки	59,1	40,3	18,7
Аммонал скальный №1	6000	1,476	7978,8	То же	60,0	37,2	22,8
То же	6000	1,476	7978,8	В трубе с забойкой в окружении водой	59,0	24,4	34,6

--/--	6000	1,476	7978,8	В трубе с водой под давлением (P=0,5 МПа)	60,0	Столбик полностью разрушен	>60
-------	------	-------	--------	---	------	----------------------------------	-----

Полученные результаты позволяют установить следующее. Взрывание зарядов ВВ в трубах без забойки показывает, что ВВ, которое имеет скорость детонации больше, обжимает свинцовый столбик в большей степени. Скорость детонации аммонала скального №1 в 1,36 раза больше скорости детонации аммонита бЖВ; при этом величина обжатия им свинцового столбика только в 1,2 раза больше, чем у аммонита бЖВ. Положение меняется для условий гидровзрывания. При взрывании аммонала скального №1 в окружении воды (гидровзрывание) получено обжатие свинцового столбика в 1,85 раза больше, чем у аммонита бЖВ без воды, т.е. его величина становится пропорционально равной отношению линейной концентрации энергии в заряде ( $7978,8/4370,1 \approx 1,83$ ). Еще большее обжатие столбика происходит при взрывании ВВ под избыточным давлением воды, равном 0,5 МПа. В этом случае свинцовый столбик полностью разрушается (на части с размером менее 10 мм). Этот результат действительно подтверждает вывод о том, что при гидровзрывании определяющим фактором в процессе разрушения среды является удельный импульс, развиваемый взрывом ВВ.

Следующая серия опытов была проведена на баллистическом маятнике с целью изучения изменения импульса взрыва в зависимости от конструкции заряда ВВ. Результаты этих опытов приведены в табл. 2. В качестве заряда ВВ использовали детонирующий шнур ДШЭ-50 (ТУ 84-606-8-79).

Табл. 2.

Результаты изучения влияния конструкции заряда ВВ на импульс взрыва при гидровзрывании

ВВ	Масса одной нитки ДШ * количество ниток ДШ в заряде	$\frac{L}{d_{ин}}$ *	$d_3, 10^{-3}$ м	Импульс взрыва, кг*с	Увеличение импульса взрыва в сравнении с зарядом из 1 нитки ДШ
1	2	3	4	5	6
ДШЭ-50	50*1	-	9,0	0,582	1,00
То же	50*3	-	23,0	1,630	2,80
--/--	50*2	0,6	9,0	2,230	3,82
1	2	3	4	5	6
--/--	50*3 3 нитки под углом 120° раздвинуты на 5 мм	-	28,0	3,850	5,25

\*  $\frac{L}{d_{ин}}$  – отношение расстояния между параллельными нитками ДШ к внутреннему диаметру трубы ( $d_{ин}=0,05$  м)

Полученные результаты указывают на значительное возрастание импульса взрыва ВВ при гидровзрывании в зависимости от конструкции заряда. Поскольку размеры заряда в опытах были постоянны, то увеличение импульса было связано или с увеличением массы взрываемого ВВ, или вследствие искусственного увеличения пикового давления в ударных волнах при их взаимодействии. В результате отражения ударных волн можно добиться примерно «удвоения удельного импульса» взрыва заряда с массой, равной заряду с массой ВВ без такого их взаимодействия. Кроме того, из механики известно, что при заданной энергии поток количества движения или импульса возрастает пропорционально корню квадратному из массы, вовлеченной в движение. Поэтому поток импульса, проходящий

через единицу площади на расстоянии  $r$  от заряда, поскольку в движение вовлечена вода ( $M_B$ ), определяется:

$$I = \frac{M_{BB}D}{27\pi r^2} \sqrt{1 + \frac{M_B}{M_{BB}}}. \quad (14)$$

При этом полезная энергия будет сохраняться, поскольку в среднем потери энергии при образовании ударной волны в воде почти в точности компенсируются собственной энергией воды, вовлеченной в движение этой ударной волной.

Теперь остановимся на рассмотрении той роли, которую играют импедансы сред, в которых движутся ударные волны. Ударная волна, идущая по среде с волновым импедансом  $(\rho, U)_{уд}$  ( $\rho$  и  $U$  обозначают плотность невозмущенной среды и скорость идущей волны соответственно), сталкиваясь с поверхностью раздела двух сред, может отразиться обратно в первую среду как волна сжатия, волна растяжения или разгрузки или может не отразиться совсем в зависимости от того, имеет ли среда за поверхностью раздела соответственно более высокий волновой импеданс  $(\rho, U)_{np}$ , более низкий волновой импеданс или одинаковый.

Уравнения несоответствия импедансов приведены в следующей форме:

$$P_{np} = P_{уд} \frac{2(\rho, U)_{np}}{(\rho, U)_{np} + (\rho, U)_{уд}},$$

$$P_{отр} = P_{уд} \frac{(\rho, U)_{np} - (\rho, U)_{уд}}{(\rho, U)_{np} + (\rho, U)_{уд}}.$$

Если импеданс второй среды такой же, как и первой среды, то давление в прошедшей волне будет таким же, как и идущей. Если  $(\rho, U)_{np} \gg (\rho, U)_{уд}$ , то  $P_{np} = 2P_{уд}$ , но если  $(\rho, U)_{np} \ll (\rho, U)_{уд}$ , то идущая волна полностью отразится как волна разряжения, так что  $P_{np} = 0$  и  $P_{отр} = -P_{уд}$ . Большое практическое значение имеет случай отражения ударной волны в воде, образованной при гидровзрывании от свободной поверхности, граничащей с

атмосферой. Так как плотность воды в 775 раз больше, чем плотность воздуха, а скорость распространения звука в воде превосходит скорость распространения звука в воздухе в 4,4 раза, то отношение волновых импедансов воды и воздуха составляет около 3400. Следовательно, при отражении подводной ударной волны от свободной поверхности должна возникать волна разряжения, способная не только полностью погасить давление в прямой волне, но и вызвать растягивающие напряжения в жидкости. Поэтому давление воздушной ударной волны будет очень малым по сравнению с давлением на фронте прямой волны. Следовательно, при гидровзрывании воздушных ударных волн при взрыве практически не будет.

Теперь рассмотрим взрывание ВВ с гидрозабойкой. Гидрозабойка в виде водонаполненных полиэтиленовых ампул не обладает преимуществами гидровзрывания, особенно в том виде, в каком она применяется в настоящее время при взрывных работах. Во-первых, диаметр ампулы гидрозабойки (37 мм) меньше диаметра шпура (42 мм), это приводит к тому, что в сильной степени ослабляется воздействие ударных волн на окружающую забойку породу. Во-вторых, гидрозабойка, как правило, расположена у устья шпура. При прямом инициировании заряда ВВ ударное воздействие на нее наименее благоприятно, так как детонационный фронт движется от гидрозабойки.

Правда, в ряде работ рассмотрена схема расположения гидрозабойки в донной части шпура. В этом случае эффективность гидрозабойки сразу возросла.

Экспериментальные исследования влияния конструкции донной части шпурового заряда на процесс разрушения при взрыве были выполнены на моделях из органического стекла в лабораториях МакНИИ под руководством и при непосредственном участии В.Н. Подставкина. Для качественного изучения процесса разрушения модели в прилегающей и донной части шпура использовалась скоростная фоторегистрация установкой СФР-2И с последовательной фиксацией фотокадров через 4 мкс.

В моделях размером 200x200x40 мм были просверлены шпуры диаметром 5 мм и длиной 90 мм. Масса взрываемого заряда ТЭНа составляла 220 мг при длине заряда 22 мм. Длина заряда составляет больше четырех его диаметров, что соответствует условиям действия торцевой части цилиндрического заряда. Длина воздушного промежутка была принята более 0,5 длины забойки и составила в эксперименте 17 мм. Диаметр водной ампулы составил 3,7 мм при длине 17 мм. Инициирование зарядов прямое.

При выполнении экспериментов соблюдалось условие геометрического и энергетического подобия.

Целью экспериментальных исследований явилось качественное подтверждение эффективности применения донной гидрозабойки для разрушения массива породы в области, прилегающей к донной части заряда.

На основании экспериментальных данных выполнена сравнительная качественная оценка взрыва в моделях: заряда сплошной конструкции; заряда с воздушной полостью в донной части; заряда с воздушно-водной полостью в донной части.

Фоторегистрация взрыва одиночного сплошного заряда (рис. 2а) показала, что после инициирования фронт разрушения среды через 24 мкс принимает овальную форму, и в дальнейшем развивается в явно выраженный овальный контур, образованный откольными трещинами. Магистральные радиальные трещины получают развитие в донной части шпура через 64 мкс. В дальнейшем 2...3 плохо выраженные трещины распространяются от донной части в направлении углубления их за область проектируемого разрушения. Угол касательных линий к магистральным трещинам, отсчитанных от донной части шпура составляет приблизительно 30°.

Рассматривая процесс взрыва конструкции заряда с воздушной полостью (рис. 2б) видно отличительную особенность развития разрушения в области воздушного промежутка. В начальный период (24 мкс) фронт разрушения имеет сложную конфигурацию, состоящую из овального фронта разрушения в области воздушной полости. Через 64 мкс формируется общий

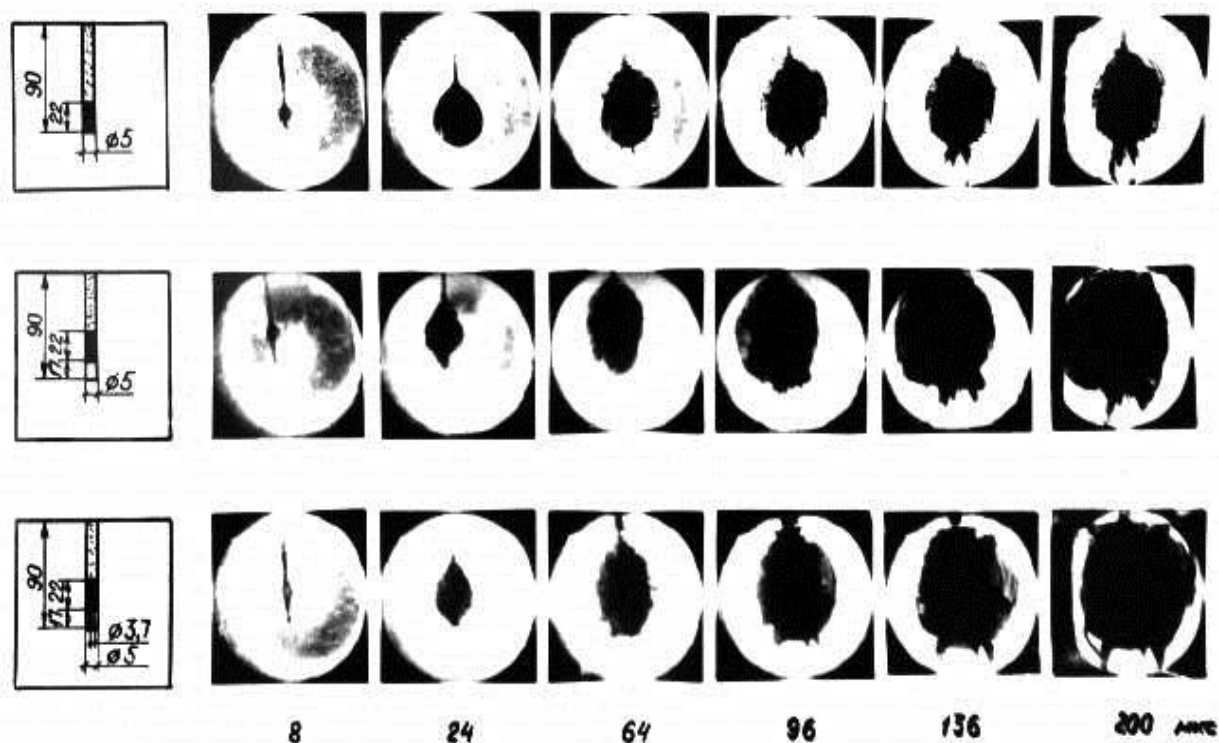


Рис. 2. Характер разрушения массива при различной конструкции заряда: а – «классическая» конструкция заряда; б – конструкция заряда с воздушной полостью в донной части; в – конструкция заряда с водо-воздушной полостью в донной части.

фронт разрушения, близкий к овальному. Угол между условными касательными увеличивается и достигает значения  $36^{\circ}$ .

Процесс разрушения модели при взрыве заряда с наличием в донной части ампулы с водой приведен на рис. 2в. Водонаполненная ампула имеет меньший диаметр, чем диаметр шпура и расположена так, что образует кольцевой воздушный зазор между стенками шпура и водяной ампулой. Это оказывает значительное воздействие на процесс разрушения. Так, уже на 24 мкс наблюдается плоский фронт разрушения в торцевой его части, т.е. там, где расположена воздушно-водная полость. Плоский фронт откольных трещин удерживается до 88 мкс. Начиная с этого момента фронт откольного разрушения опережает радиальные магистральные трещины. Угол наклона касательных составляет  $45^{\circ}$ .

Аналогичные экспериментальные взрывания были выполнены для сближенных зарядов, чтобы установить влияние их взаимодействия на трещинообразование (разрушение) в среде при различной конструкции зарядов. В начальный период до 20 мкс для всех случаев (рис. 3а,б,в) наблюдается тот же процесс формирования фронта разрушения, что и при взрыве одиночных зарядов. Влияние воздушно-водного промежутка и здесь способствует образованию плоского фронта разрушения в торцевой части заряда (рис. 3в).

Отличительной особенностью взрывания сближенных зарядов является образование области разрушения по средней линии между зарядами за счет соударения волн напряжений от каждого из зарядов на 24 мкс еще до соприкосновения основных фронтов зон разрушения. После 88 мкс наблюдается развитие радиальных трещин в донной части. Направление их развития сохраняет аналогичную тенденцию выполаживания в зависимости от конструкции заряда в донной части шпура.

При взрывании конструкции заряда с воздушно-водной полостью радиальные трещины направлены к поверхности предполагаемой отбойки, что видно на рис. 3в (136 мкс).

Выполненные экспериментальные исследования показывают, что применение конструкции зарядов с воздушно-водной полостью способствует изменению направления трещинообразования, уменьшению закольных трещин вглубь массива за зоной отрыва.

С целью проверки полученных данных в реальных условиях взрывания в буровзрывной лаборатории ДонНТУ были проведены следующие опытные взрывания.

В центре камеры подвешивались и взрывались сначала один патрон ВВ, а затем патрон ВВ с прикрепленной к торцу патрона гидрозабойкой из водонаполненной ампулы (параметры патронов: длина – 150 мм, диаметр – 23 мм, масса одного патрона – 80 г; параметры ампулы: длина – 110 мм, диаметр – 37 мм). Результаты взрывания регистрировались на пленку (рис. 4).



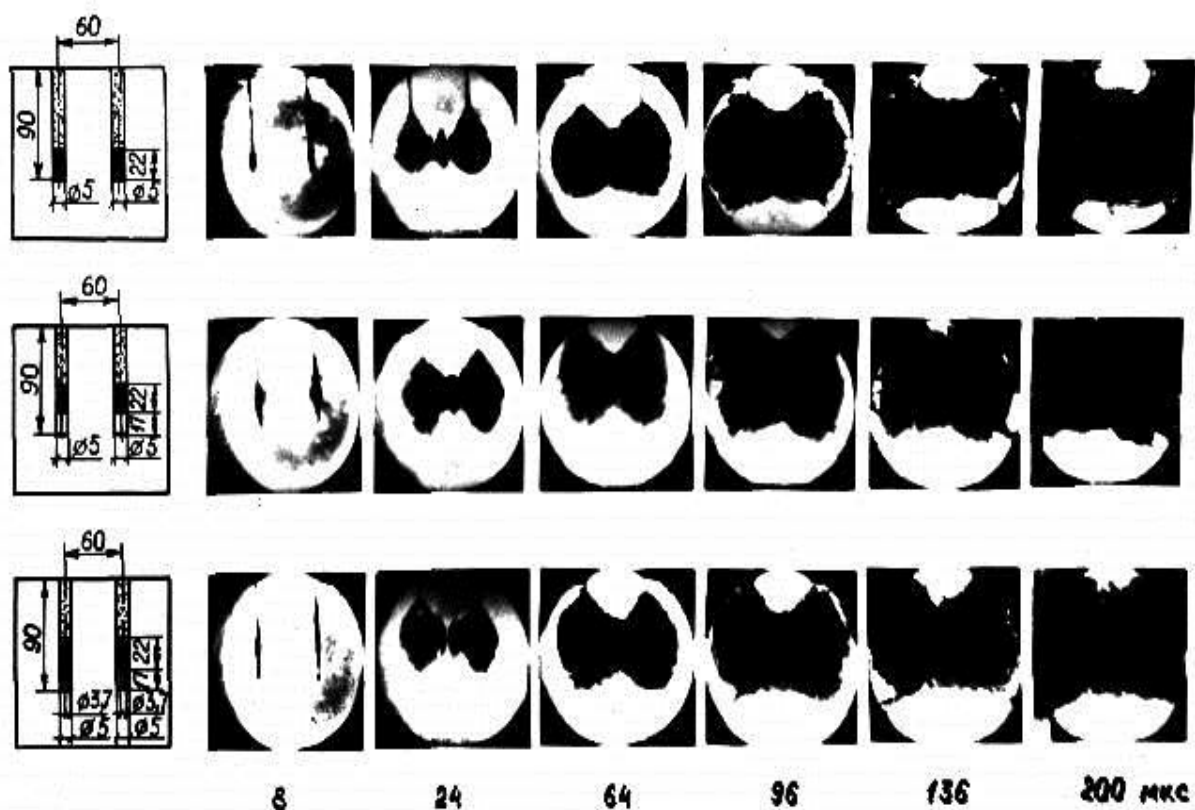


Рис. 3. Характер разрушения массива при различной конструкции заряда для сближенных зарядов: а – «классическая» конструкция заряда; б – конструкция заряда с воздушной полостью в донной части; в – конструкция заряда с водо-воздушной полостью в донной части.

Из результатов проведенных лабораторных взрываний видно, что при взрывании патрона без гидрозабойки продукты детонации распространяются примерно перпендикулярно поверхности заряда (боковой и торцам). Причем разлет продуктов детонации в направлении, обратном инициированию, меньше, чем разлет в направлении детонации. При использовании гидрозабойки происходит перераспределение концентрации энергии взрыва: уменьшился разлет продуктов детонации в направлении, обратном инициированию (по сравнению со взрыванием одиночного патрона ВВ без гидрозабойки); значительно уменьшился разлет продуктов

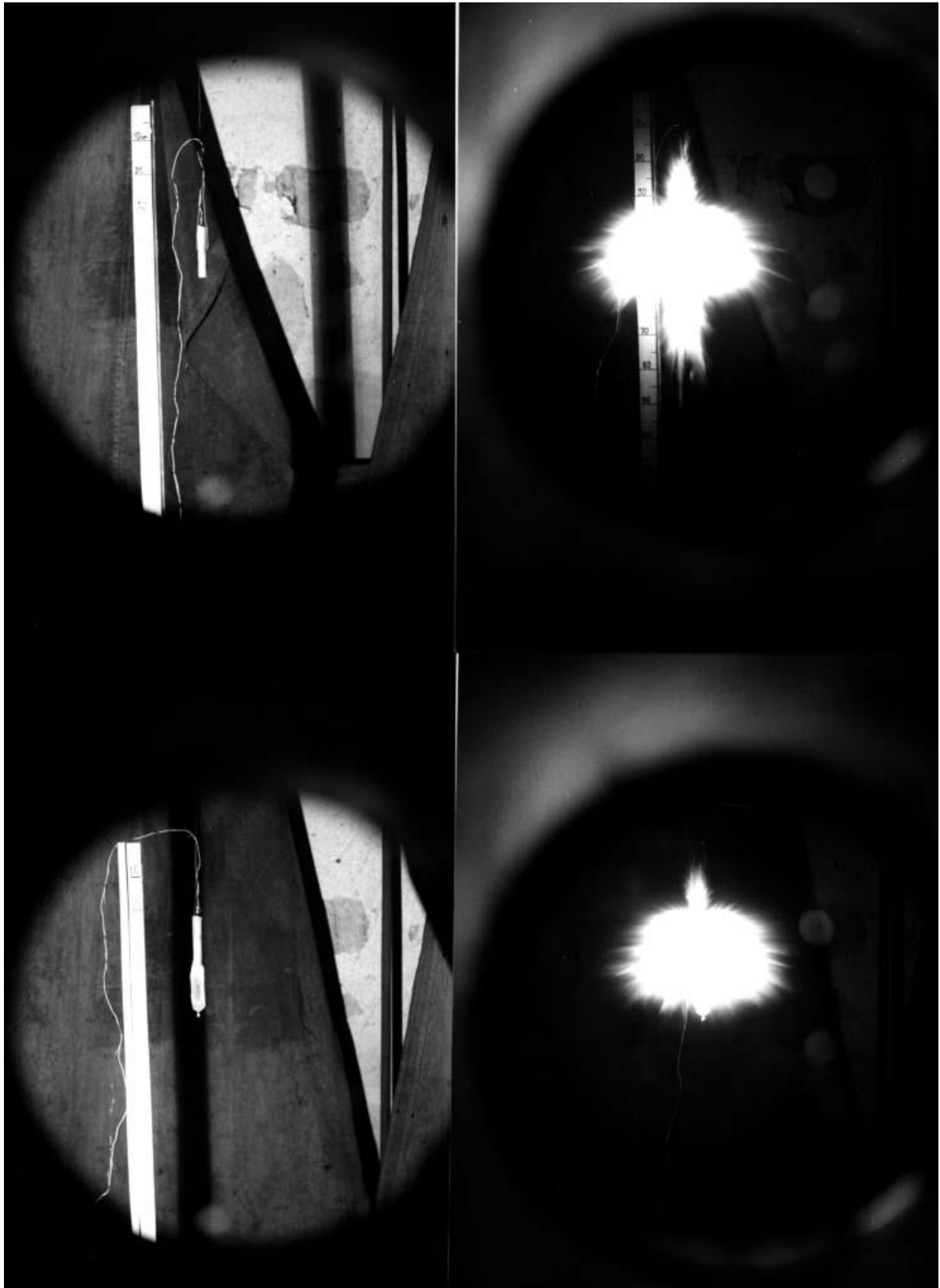


Рис. 4. Результаты взрывания одиночного патрона ВВ (а) и патрона с гидрозабойкой (б).

детонации по направлению инициирования заряда ВВ; по мере удаления от источника детонации в направлении ее распространения (от начала заряда почти до конца гидрозабойки) разлет продуктов детонации в радиальном направлении возрастает. Результаты этих лабораторных исследований подтверждают результаты, полученные при исследовании на блоках из оргстекла.

Следующий этап исследований – шахтные эксперименты, проведенные в шахте им. А.Г. Стаханова ПО «Красноармейскуголь» под руководством В.Н. Подставкина.

Исследования динамических полей напряжений в угольном пласте по длине шпурового заряда производились при сплошном заряде и заряде, в донной части которого помещались полиэтиленовые ампулы, заполненные водой или воздухом. Применялись полиэтиленовые ампулы с обратным клапаном длиной 0,10..0,25 м и диаметром 34-39 мм. В качестве ВВ использовался угленит Э-6 диаметром 36 мм, угленит 12ЦБ в бумажной оболочке диаметром 36 мм и угленит 12 ЦБ а полиэтиленовой оболочке (П12ЦБ) диаметром 39 мм. Масса заряда во всех опытах составляла 0,8 кг.

Применялась стандартная измерительно-регистрирующая аппаратура, разработанная в институте геотехнической механики. Емкостные измерительные преобразователи с помощью поршневого устройства устанавливались в шпурах и фиксировались бетонным раствором на различных расстояниях от оси заряда ВВ в сечениях, ортогональных продольной оси выработки. Изменение емкости измерительного преобразователя под действием нагрузки преобразовывалось в изменение напряжения и регистрировалось магнитным регистратором. Количество единичных экспериментов при доверительной вероятности 0,9 в среднеквадратичной погрешности измерения динамических взрывных напряжений равнялось трем.

Распределения максимальных тангенциальных напряжений в угольном пласте с коэффициентом крепости угля  $f=1,5$  вдоль зарядов ВВ на расстоянии 30 радиусов шпура, представлены на рис. 5. Для сплошного заряда (зависимость 1) максимум напряжений имеет место в средней части заряда, по мере приближения к забою шпура напряжения монотонно уменьшаются. Для зарядов с воздушной (зависимость 2) и водо-воздушной (зависимость 3) полостями в донной части шпура, по сравнению со сплошным зарядом, напряжения напротив середины заряда не имеют ярко выраженного максимума, а напротив донной части шпура, где расположена ампула, напряжение выше, чем для сплошного

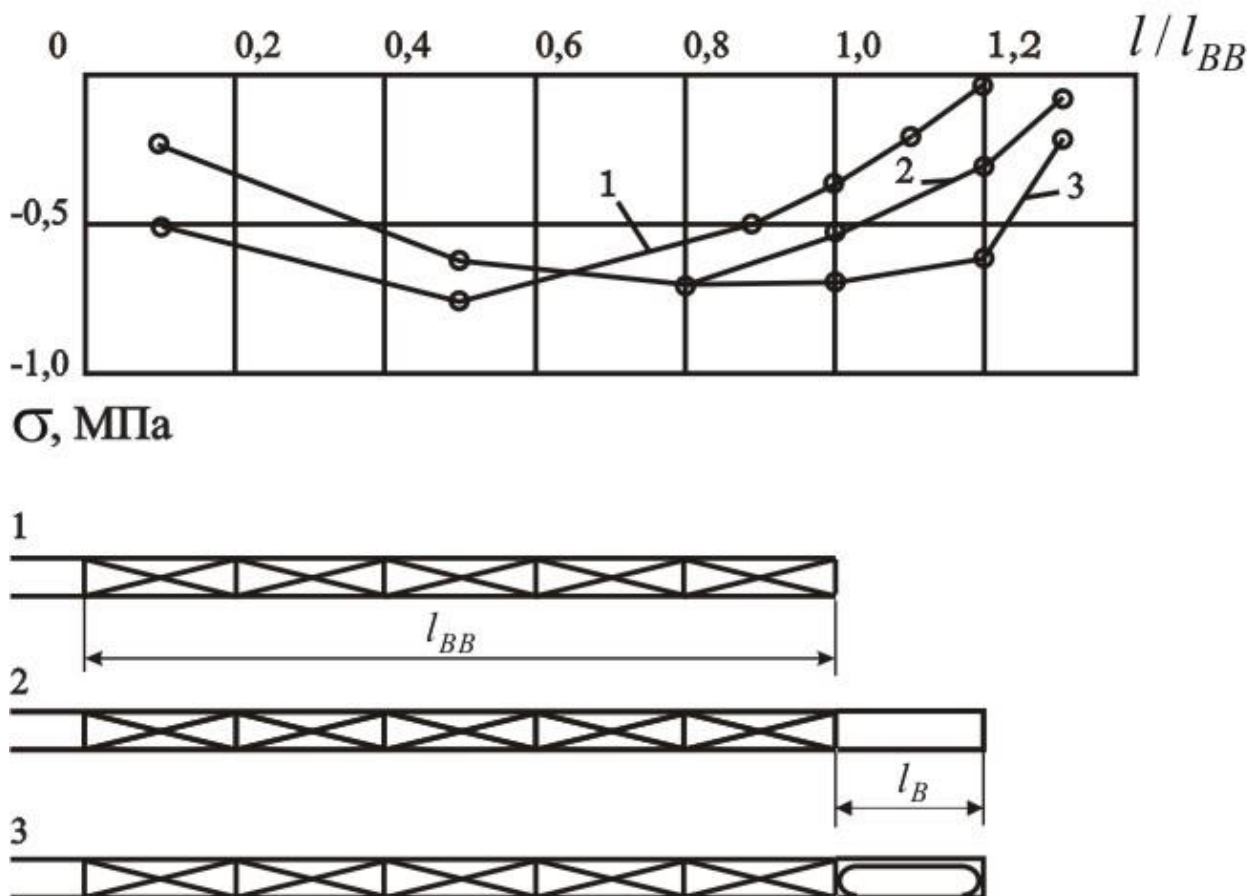


Рис. 5. Распределение максимальных касательных (тангенциальных) напряжений в угольном пласте с коэффициентом крепости угля  $f=1,5$  вдоль зарядов ВВ на расстоянии 30 радиусов шпура: 1 – «классическая» конструкция заряда; 2 – конструкция заряда с воздушной полостью в донной части; 3 – конструкция заряда с водо-воздушной полостью в донной части.

заряда. При этом вглубь массива более резкий спад напряжений наблюдается для заряда с водонаполненной ампулой в донной части шпура.

Средний радиус зоны разрушения угля вдоль зарядов для заряда угленита Э-6 и патронов П12ЦБ составил 16 их диаметров, а против конца водной ампулы оптимальной длины – 14 диаметров. Оптимальной для данных типов ВВ и данных условий принималась длина ампулы, которая соответствовала глубине проникновения продуктов взрыва вглубь гидроампулы. Распределения полей напряжений вокруг заряда ВВ для угленита Э-6 и патронов П12ЦБ отличаются незначительно.

С целью проверки и контроля оптимальных размеров водной ампулы в экспериментах использовали также метод трубок-свидетелей. При взрыве одиночного заряда с водонаполненной ампулой в дне шпура характер деформации трубки напротив патронов не изменяется. Напротив ампулы характер деформации трубки различный и зависит от зазора между ампулой и стенками шпура. При диаметре ампулы 39-40 мм и диаметре шпура 42 мм на трубке остаются прерывистые сплющивания и борозды длиной 2-4 мм. Такое явление наблюдается на длине трубки за зарядом длиной до 70 мм. При диаметре ампулы 34-36 мм сплющивания имеют такой же вид, как и против патронов на длину от 90 до 170 мм. При диаметре ампулы 20 мм и длине 150 мм часть трубки находящейся в дне, разбивается. Таким образом, с увеличением диаметра донной гидрозабойки (снижении величины радиального зазора) эффективность разрушения в исследованном диапазоне размеров ампулы повышается.

Анализ проведенных лабораторных и шахтных экспериментов, экспериментально полученных распределений полей напряжений, показывает, что применение водонаполненной ампулы в донной части шпурового заряда уменьшает разрушения вглубь массива, обеспечивая более равномерное разрушение массива породы вдоль заряда, увеличение эффективности взрыва в донной части заряда с повышением коэффициента использования шпуров, в некоторых

случаях – до единицы.

Наиболее высокая эффективность использования гидрозабойки достигается, когда она расположена как у устья шпура, так и в его донной части. Отмечено, что при обратном инициировании заряда ВВ гидрозабойка в устье шпура обеспечивает больший эффект взрыва.

Наиболее полно механизм действия устьевого гидрозабойки исследован в работах [5]. Схема опыта и характер действия гидрозабойки на раздутие проложенных вдоль шпурового заряда латунных трубок приведен из этих работ на рис. 6 и рис. 7. Вместе с тем, характер раздутия латунных трубок и результаты расчета действия эпюр давления сжатой воды на эти трубки указывает на то, что характер разрушения может быть и иным.

В частности, предложена модель взаимодействия продуктов детонации ВВ с гидрозабойкой в виде сходящихся навстречу друг другу струй с соответствующими плотностями и скоростями. В результате получено уравнение, которое описывает глубину проникновения продуктов детонации ( $L$ ) в воду гидрозабойки:

$$L = l_{ВВ} \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_в}}, \quad (15)$$

где  $l_{ВВ}$  – длина струи продуктов детонации, двигающихся навстречу гидрозабойке;

$\rho_k$  – плотность продуктов детонации в момент их входа в воду;

$\rho_в$  – плотность воды.

При ударе продуктов детонации о воду в ней возникает ударная волна, начальные параметры которой определяются характеристиками заряда ВВ. Расчет начальных параметров

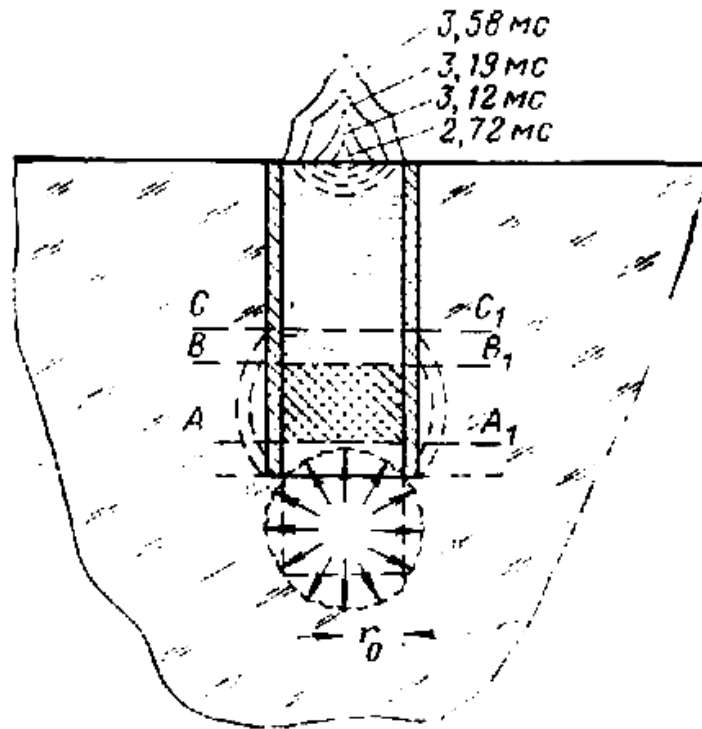


Рис. 6. Выброс жидкости из шпура под воздействием отраженной ударной волны

сделан в монографии Ф.А. Баума [2], которые имеют следующий вид:

$$U_x = \frac{D}{n+1} \left\{ 1 + \frac{2n}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_x}{P_n} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right] \right\}, \quad (16)$$

$$U_x = \sqrt{(P_x - P_0)(V_0 - V_x)}, \quad (17)$$

где  $U_x$  – скорость движения границы раздела;  
 $P_x$  – начальное давление на границе раздела;  
 $D$  – скорость детонации ВВ;  
 $P_n$  – давление детонации;  
 $U_0, U_x$  – удельные объемы среды перед и за фронтом ударной волны.

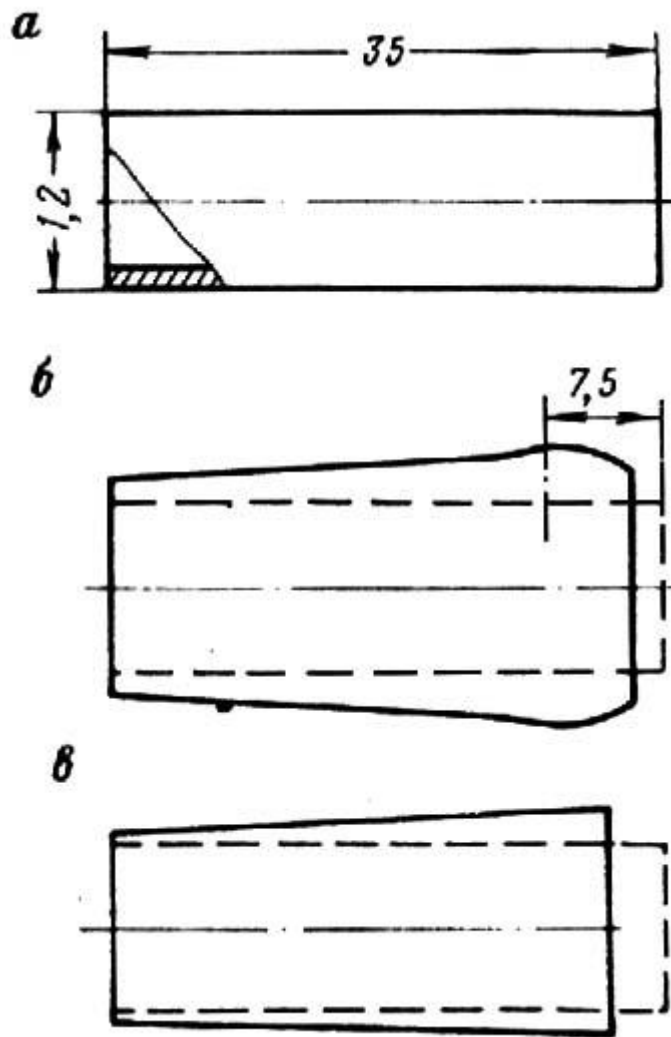


Рис. 7. Характер раздутия латунных трубок при наличии в них песчаной и водяной забойки: а – без забойки; б – водяная забойка; в – песчаная забойка

Закон ударной сжимаемости воды по данным Коула имеет вид:

$$P = 3047 \left[ \left( \frac{\rho_c}{\rho_{oc}} \right)^{7,15} - 1 \right], \text{ кг/см}^2. \quad (18)$$

Из уравнений (17) и (18) получим:

$$U_x = \sqrt{\left( \frac{\rho_x}{\rho_0} \right) \left( 1 - \left[ 1 + \frac{P_x}{3047} \right]^{\frac{-1}{7,15}} \right)}. \quad (19)$$



Уравнения (16) и (19) полностью определяют поставленную задачу. Решать эту систему удобно графическим методом. Для этого в системе координат  $P, U$  нужно построить графики уравнений (16) и (19) и найти точку пересечения кривых.

Тогда величина  $l_{BB}$  будет определена из уравнения

$$l_{BB} = U_x dt = (U_x \cdot t_k),$$

а величину  $\frac{\rho_k}{\rho_v}$  – из уравнения состояния воды и давления  $P_x$ .

Изложенные положения теории гидровзрывания при разрушении горных пород позволяют управлять этим способом и выбирать оптимальные параметры заряда ВВ или гидрозабойки шпуров.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. При гидровзрывании характер и масштабы разрушения горных пород определяются удельным импульсом взрыва ВВ и величиной пикового давления во фронте ударной волны. Данные параметры поддаются управлению при гидровзрывании, что позволяет при абсолютно одинаковом эффекте взрыва ВВ в обычных условиях снизить расход ВВ в 5-6 раз при гидровзрывании.

2. Вследствие высокого волнового импеданса воды обеспечивается передача удельного импульса взрыва горным породам практически без потерь. В то же время при взрыве практически не образуется воздушных ударных волн и обеспечивается практически полная безопасность взрывных работ.

3. Способ применения гидрозабойки как частный случай гидровзрывания не обеспечивает преимущества этого способа.

4. Повышение эффективности взрывания ВВ с гидрозабойкой может быть существенно увеличено при условии совместного применения гидрозабойки у устья и у дна шпура. При этом необходимо осуществлять способ обратного

инициирования заряда ВВ или располагать патрон-боевик в середине шпурового заряда.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 312 с.
2. Физика взрыва/ Баум Ф.А., Станюкович К.П., Орленко С.И. и др./ Под ред. К.П. Станюкевича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
3. Р. Коул. Подводные взрывы. – М.: Иностран. литерат., - 1950. – 490 с.
4. Шустов Н.В. Взрывогидравлический способ разрушения твердых сред. – М.: Недра, 1968. – 48 с.
5. Левчик С.П., Табатадзе Б.З. О механизме действия гидрозабойки // Безопасность взрывных работ в шахтах: Сб. «Взрывное дело», №72/29. – М.: Недра, 1973. – с. 247-257.
6. Баум Ф.А. Процессы разрушения горных пород взрывом: Сб. «Взрывное дело», № 52/9. – М.: Госгортехиздат, 1963. – с. 262-272.