

Результаты горных работ показали, что комплексное использование всей информации о строении и состоянии массива горных пород позволяет получить наиболее полную и достоверную картину тектонической нарушенности угольных пластов.

### Библиографический список

1. Богданов М.С., Кудельский В.В. Временное методическое руководство по применению МОВ для изучения малоамплитудной тектоники угольных месторождений Донбасса с пологим залеганием пластов. — Киев: МГ УССР, 1984. — 184 с.

2. Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Анциферов В.А. Использование сейсмической разведки для картирования тектонической нарушенности угольных пластов // Проблемы гірського тиску: Зб.наук.пр. №5 / ДонДТУ. — Донецьк, 2001 — С. 42–47.

© Тиркель М.Г., 2002

УДК 622.235

ШЕВЦОВ Н.Р., ЛАБИНСКИЙ К.Н. (ДонНТУ), КАЛЯКИН С.А. (ООО «СНЭЙК»)

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДЛИНЫ ДОННО-УСТЬЕВОЙ ГИДРОЗАБОЙКИ

Развитие угольной промышленности Украины ведет к непрерывному росту глубины разработки. С повышением глубины растет и газообильность шахт. В результате этого условия проведения выработок постоянно ухудшаются, становясь все более сложными и опасными. Поэтому наиболее важную роль играют исследования, направленные на повышение безопасности и эффективности добычи угля и проведения выработок.

Одной из технологий безопасного и эффективного разрушения горных пород является гидровзрывание. Однако, не смотря на его эффективность и безопасность, его применение затруднено из-за отсутствия промышленных ВВ, способных устойчиво детонировать в воде под избыточным давлением.

Частным случаем гидровзрывания является использование гидрозабойки в виде водонаполненных полиэтиленовых ампул. Их конструкция не обладает всеми преимуществами гидровзрывания, особенно в том виде, в котором они применяются в настоящее время при взрывных работах, а именно: диаметр гидроампулы составляет 37 мм, что меньше диаметра шпура (42 мм), а длина равна 350 мм независимо от условий взрывания. Это приводит к ослаблению воздействия ударных волн на окружающую забойку породу.

В известных работах механизм повышения эффективности взрывных работ за счет использования гидрозабойки рассматривается только когда она располагается у устья шпура. Относительно эффективности донной гидрозабойки при взрывных работах известно гораздо меньше и данные носят противоречивый характер.

Например, в работе С.А.Калякина и др. эффективность гидрозабойки объяснялась тем, что за счет ее использования место столкновения отраженной от дна шпура ударной волны и детонационной волны, вызывающее резкий скачок давления над зарядом ВВ, смещалось в область донной забойки, тем самым ВВ не переуплотнялось. Но это не объясняло изменение направления распространения радиальных трещин у дна шпура при разрушении породы зарядом ВВ с донной гидрозабойкой.

В работах МакНИИ эффективность использования донной гидрозабойки объясняется тем, что газообразные продукты взрыва на сверхзвуковой скорости обтека-

ют гидрозабойку, при этом они изменяют скорость и увеличивают давление на боковые стенки в зазоре между гидрозабойкой и стенками шпура. Однако это противоречит теории детонации [1], из которой известно, что продукты детонации в начальный момент разлета обладают свойствами твердого тела, и уже только после точки сопряжения ударных адиабат становятся газообразными.

В работе [2] рассматривается столкновение продуктов детонации, обладающих свойствами твердого тела, с гидрозабойкой. Приведена формула для определения глубины проникновения продуктов детонации в ампулу донной гидрозабойки. Для проверки достоверности этой формулы в лаборатории БВР ДонНТУ были проведены экспериментальные взрывания, результаты которых фиксировались на неподвижную фотопленку.

При проведении экспериментов использовались патроны аммонита Т-19 массой 80 г. Целью взрываний было определение характера разлета продуктов детонации заряда при наличии и без наличия препятствий по ходу детонации. Установлено, что при взрыве одиночного патрона ВВ (рис. 1) разлет продуктов детонации происходил примерно перпендикулярно поверхности заряда. Причем разлет в направлении, обратном направлению детонации, меньший, чем в направлении детонации.

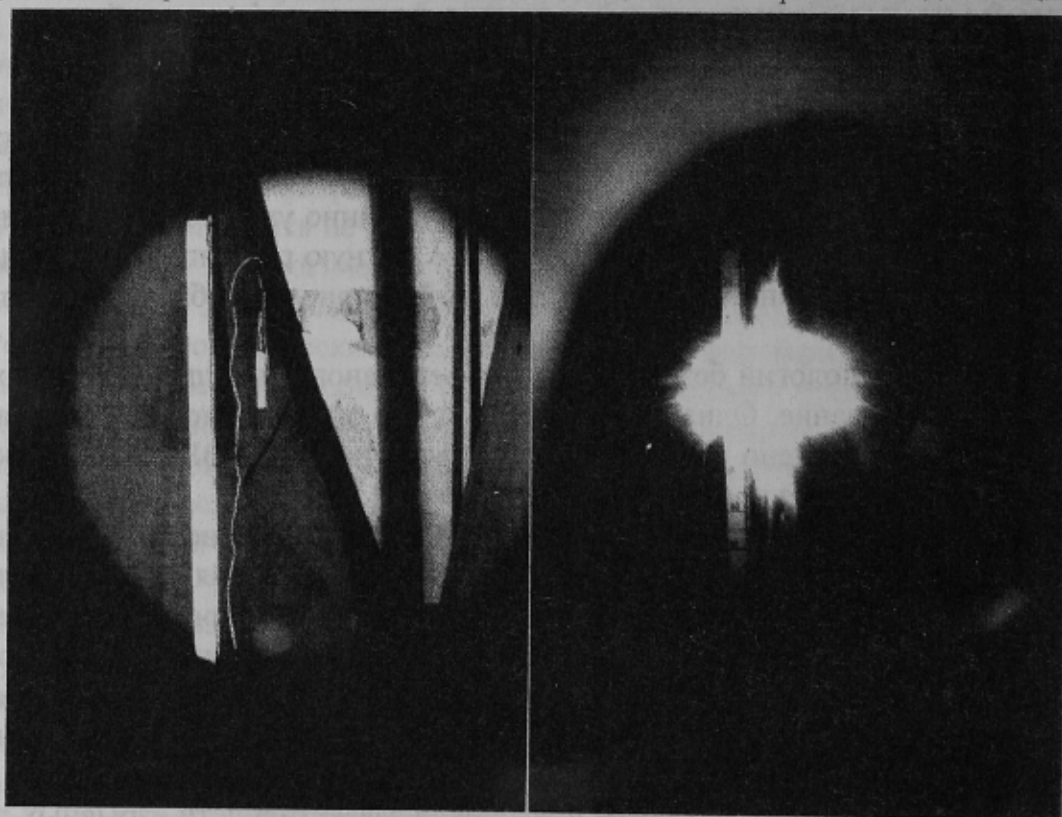


Рис. 1. Разлет продуктов детонации при взрыве патрона ВВ

Целью второго этапа проведения лабораторных экспериментов было определение влияния донной гидрозабойки из водонаполненной ампулы различной длины на характер разлета продуктов детонации и установление глубины их проникновения в гидрозабойку. Было проведено три серии взрываний, каждая из которых отличалась длиной донной гидрозабойки (гидроампулы). Использовались гидроампулы длиной 120, 190 и 280 мм (рис. 2).

В результате проведения экспериментов получены следующие результаты. Характер разлета продуктов детонации не отличается от описанного в работе [2]. Независимо от длины гидрозабойки в ее части, примыкающей к заряду ВВ во всех

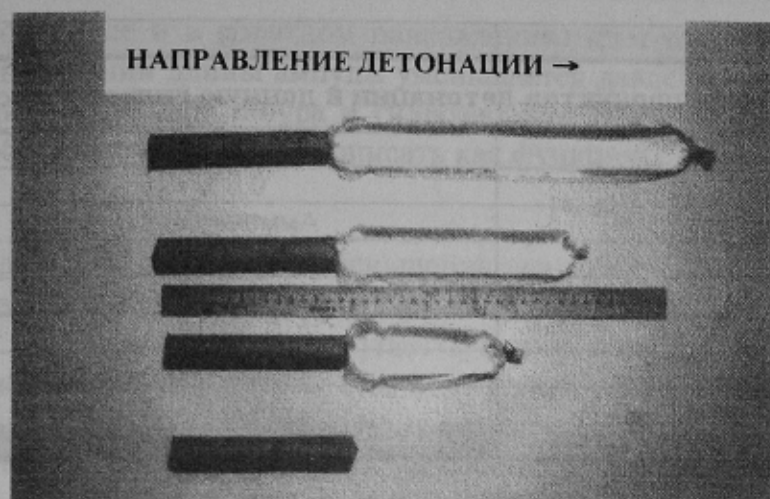


Рис. 2. Конструкции зарядов с использованием гидрозабоек различной длины

[3], а именно:

$$l = l_{BB} \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_w}}, \quad (1)$$

где  $l_{BB}$  — длина струи продуктов детонации, двигающихся навстречу гидрозабойке;  $\rho_k$  — плотность продуктов детонации в момент их входа в воду;  $\rho_w$  — плотность воды.

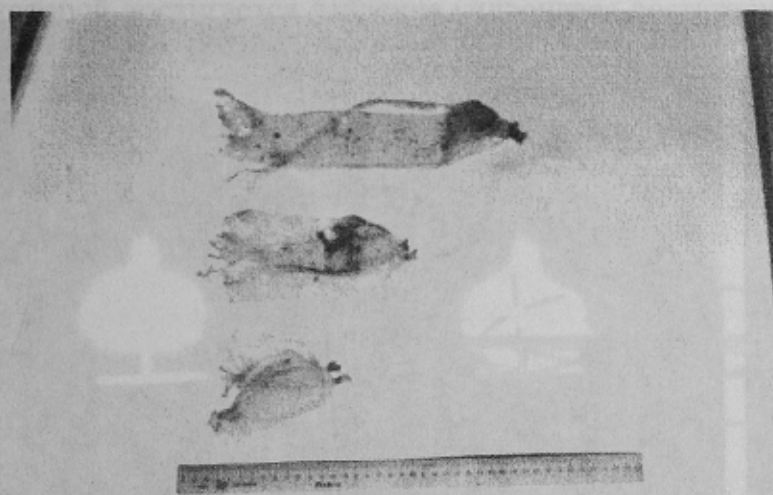


Рис. 3. Разрушение ампул гидрозабоек разных длин взрывом

независимо от длины гидрозабойки величина характерного разрушения примыкающей к заряду части составила 32...35 мм. Очевидно, что при отсутствии жесткого подпора ударной волной гидрозабойкам сообщалось ускорение, тем самым изменяя скорость движения струи воды с нулевой на отрицательную по отношению к направлению до точки встречи струй жидкостей. И чем больше масса гидрозабойки, тем меньшее ускорение она получала, и тем большее проникновение продуктов детонации в гидрозабойку.

случаях наблюдаются характерные разрушения ампулы, подтверждающие теорию о расклинивании продуктами детонации гидрозабойки. При длине ампулы 120 мм длина разрушения ампулы составила 26...28 мм, при длине 190 мм — 28...30 мм, при длине 280 мм — 31...33 мм (рис. 3). Величина проникновения продуктов детонации в ампулу гидрозабойки рассчитывалась при помощи MSExcel по формуле, предложенной в работе

Результаты расчета приведены на рис. 4.

На третьем этапе исследований были проведены эксперименты для проверки влияния гидрозабойки на перераспределение энергии взрыва в условиях, приближенных к реальным, т.е. для определения влияния дна шпура гидрозабойку опирали на бетонный блок (рис. 5). Были испытаны вторая и третья сверху конструкции зарядов, изображенные на рис. 2.

Результаты экспериментов показали (рис. 6), что

	А	В
1	<b>Расчет глубины проникновения продуктов детонации в донную гидрозабойку</b>	
2	Номер ВВ	5
3	Масса заряда, кг	0,080
4	Наименование ВВ	Аммонит Т-19
5	Плотность патронирования, кг/м <sup>3</sup>	1050
6	Показатель политропы ВВ n	2,60
7	Объем заряда, м <sup>3</sup>	0,00008
8	Приведенный радиус заряда, м	0,0264
9	Плотность ВВ во фронте детонации, кг/м <sup>3</sup>	1453,85
10	Длина проникновения продуктов детонации в ампулу	<b>0,0311</b>
11		
12	Цветовые обозначения	
13	Вводимые значения	
14	Значения из базы данных о ВВ	
15	Рассчитываемые значения	
16	<b>Длина гидрозабойки</b>	

Рис. 4. Расчет проникновения продуктов детонации в донную гидрозабойку при помощи MSExcel

Как видно из экспериментов (рис.6), характер разлета продуктов детонации отличается от экспериментов с отсутствием опоры для гидрозабойки увеличением разлета в направлении, обратном инициированию, при уменьшении длины ампулы.

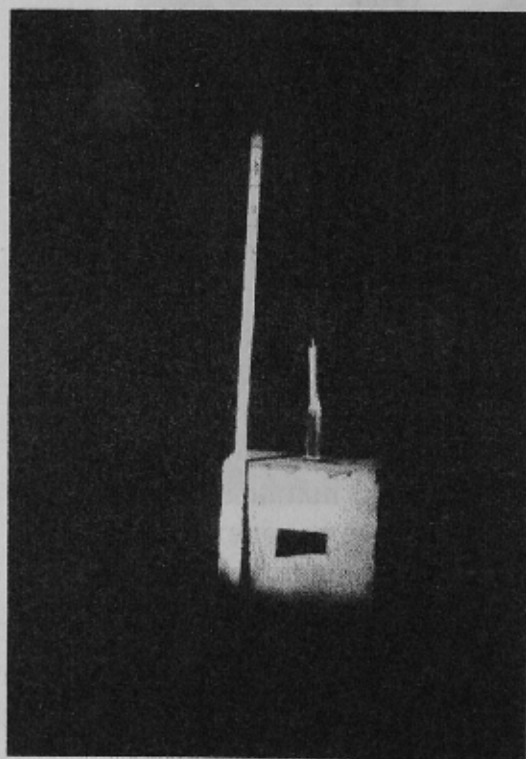


Рис. 5. Схема имитации дна патрона

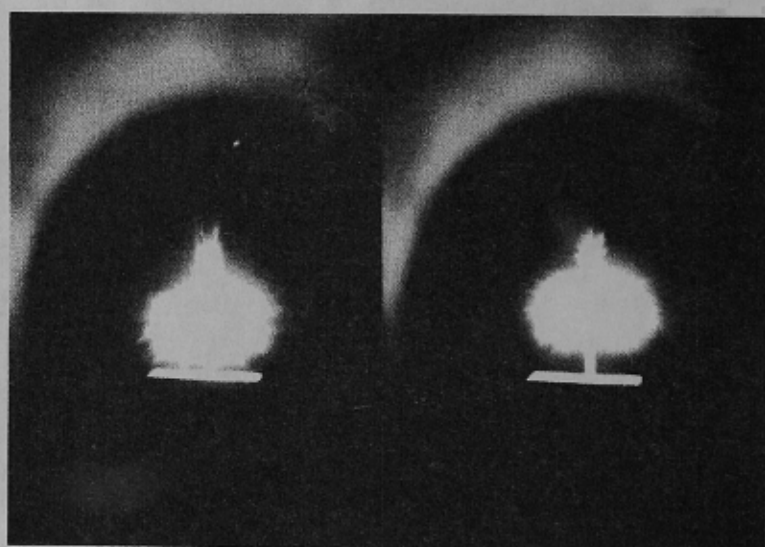


Рис. 6. Разлет продуктов детонации при разной длине гидрозабоек

Анализируя фотографии взрывов зарядов с гидрозабойками, можно сделать вывод о том, что при достижении ударной волной, идущей в гидрозабойке, жесткой опоры (дна шпура), происходит гидроудар, при этом давление в месте встречи ее с преградой удваивается и во всех направлениях (в

том числе и в обратном направлении) идет отраженная волна. Очевидно, что при увеличении длины ампулы уменьшается давление гидроудара. Максимальное давление на границе шпура и гидрозабойки будет зависеть от длины гидрозабойки и в общем виде его можно описать как функцию следующего вида:

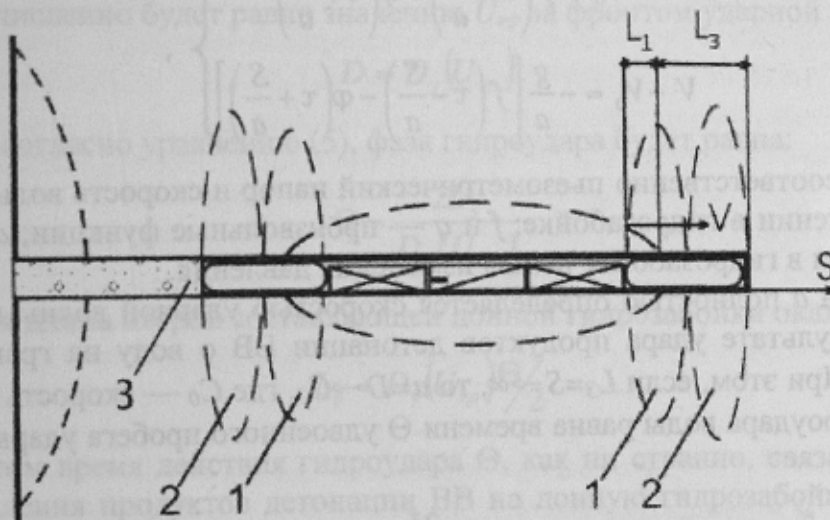
$$P=F(l, t),$$

где  $F(l, t)$  — функция уменьшения давления воды по мере увеличения длины гидрозабойки и времени гидроудара.

Таким образом, существующие способы определения оптимальной длины гидрозабойки и результаты, полученные при проведении лабораторных экспериментов, позволяют сделать вывод о том, что расчет длины донной гидрозабойки базируется на определении двух ее составляющих (рис. 7). Первая составляющая длины гидрозабойки — это та ее часть, которая расклинивается продуктами детонации на величину, определяемую по формуле (1). Вторая составляющая длины гидрозабойки определяет ее часть, зависящую от величины давления при гидроударе воды о дно шпура. Она рассчитывается по известным уравнениям динамики движения жидкости с введением в них ограничений, касающихся зависимости предела прочности пород на разрушение от величины волн напряжений. Отсюда вытекает предлагаемый метод расчета оптимальной длины гидрозабойки:

$$l_{\text{заб. расч.}} \leq l_{\text{ВВ}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{с}}}} + f(\sigma), \quad (2)$$

где  $f(\sigma)$  — функция изменения длины донной гидрозабойки от давления воды, при которой достигается давление гидроудара достаточное для разрушения окружающего массива с пределом прочности  $[\sigma]_{\text{сж}}$



**Рис. 7.** Схема разрушения массива зарядом ВВ с гидрозабойками: 1 — область разрушения массива от расклинивания гидрозабоек, 2 — область разрушения массива от гидроудара у дна гидрозабоек, 3 — запирающая забойка шпура

Метод определения вида функции  $f(\sigma)$  при резком изменении давления при гидроударе о дно шпура базируется на основных уравнениях, описывающих динамику неустановившегося движения воды в донной гидрозабойке. Течение при гидравлическом ударе описывается системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial S} &= i_f + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial \tau} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial S} \\ \frac{\partial H}{\partial \tau} - V \frac{\partial H}{\partial S} &= \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial S} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $H = z + \frac{P}{\rho g}$  — пьезометрический напор;  $V$  — средняя скорость воды;  $S$  — координата, отсчитываемая вдоль гидрозабойки;  $a$  — скорость распространения ударной волны по гидрозабойке;  $i_f$  — потеря напора по длине гидрозабойки.

Поскольку длина гидрозабойки сравнительно невелика, то потерей напора  $i_f$  пренебрегаем. Также пренебрегаем членами  $V \frac{\partial H}{\partial S}$  и  $V \frac{\partial V}{\partial S}$ .

Используем уравнение гидроудара в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} &= a^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} \\ \frac{\partial H}{\partial \tau^2} &= a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial S^2} \end{aligned} \right\}$$

Поскольку величинами  $i_f$  и  $\frac{V^2}{2g}$  пренебрегают, при установившемся режиме пьезометрический напор воды по длине гидрозабойки постоянен.

Тогда система уравнений (3) приводится к двум волновым уравнениям, общее решение которых применительно к рис. 7 имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} H - H_0 &= f\left(\tau - \frac{S}{a}\right) + \varphi\left(\tau + \frac{S}{a}\right) \\ V - V_0 &= -\frac{g}{a} \left[ f\left(\tau - \frac{S}{a}\right) - \varphi\left(\tau + \frac{S}{a}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $H_0$  и  $V_0$  — соответственно пьезометрический напор и скорость воды при установившемся движении в гидрозабойке;  $f$  и  $\varphi$  — произвольные функции;  $a$  — скорость распространения в гидрозабойке волны изменения давления.

Величина  $a$  полностью определяется скоростью ударной волны в воде  $D$ , получаемой в результате удара продуктов детонации ВВ о воду на границе раздела «ВВ — вода». При этом, если  $L_3 = S \rightarrow \infty$ , то  $a = D \rightarrow C_0$ , где  $C_0$  — скорость звука в воде. Тогда фаза гидроудара воды равна времени  $\Theta$  удвоенного пробега ударной волны по гидрозабойке:

$$\Theta = \frac{2L_3}{D} \quad (5)$$

Ударное изменение напора определяется формулой:

$$H_K - H_0 = \frac{a}{g} (V_0 - V_K).$$

Вместе с тем изменение ударного напора равно увеличению давления воды при гидроударе, при этом у дна шпура движение воды практически равно нулю

( $V_k=0$ ). Тогда пренебрегая сжимаемостью воды можно определить давление воды при гидроударе:

$$P_y = \rho_e D V_0. \quad (6)$$

Учитывая, что критические напряжения сжатия породы определяются конечным действием давления воды на них, то при гидроударе можно записать:

$$[\sigma]_{сж} = P_y,$$

т.е. разрушающее напряжение связано с действующим на породу давлением воды. Тогда граничное условие, определяющее разрушение породы при гидроударе, есть ни что иное как величина напряжения, рассчитанная по уравнению:

$$[\sigma]_{сж} = \rho C_0 V_{кр}, \quad (7)$$

при котором длина донной гидрозабойки  $L_3 \rightarrow S_{max}$ .

Из уравнения (7) получается, что для каждой породы существует критическая скорость движения воды, при которой осуществляется ее разрушение:

$$V_{кр} = \frac{[\sigma]_{сж}}{\rho C_0}. \quad (8)$$

Поскольку величина  $[\rho C_0] = const$ , то критическому значению скорости потока жидкости за ударной волной  $V_{кр}$  соответствует критическая скорость ударной волны  $D$  в воде. Используя расчеты параметров фронта сильной ударной волны в воде, выполненное Кирквудом и Ричардсоном [4], можно установить связь между скоростью ударной волны в воде  $D$  и скоростью потока за ее фронтом  $U$ . При этом значение  $V_{кр}$  численно будет равно значению  $U_{кр}$  за фронтом ударной волны:

$$D = D_y(U_{кр}).$$

Тогда, согласно уравнению (5), фаза гидроудара будет равна:

$$\Theta = \frac{2L_3}{D_y(U_{кр})}, \quad (9)$$

а оптимальная длина второй составляющей донной гидрозабойки окажется равной:

$$L_3 = D_y(U_{кр}) \frac{\Theta}{2}. \quad (10)$$

При этом время действия гидроудара  $\Theta$ , как ни странно, связано с временем действия давления продуктов детонации ВВ на донную гидрозабойку (см. систему уравнений (3) касательно скоростного напора жидкости — зависимость от  $\tau$ ). Время действия этого давления —  $\tau$  функционально связано с временем запираения продуктов взрыва во взрывной полости —  $t_3$  и, как установлено в работах Н.Р.Шевцова, С.А.Калякина и др., определяется длиной забойки —  $L_y$  у устья шпура и скоростью ее выбрасывания —  $V_{заб}$ :

$$t_3 = \frac{L_y}{V_{заб}}. \quad (11)$$

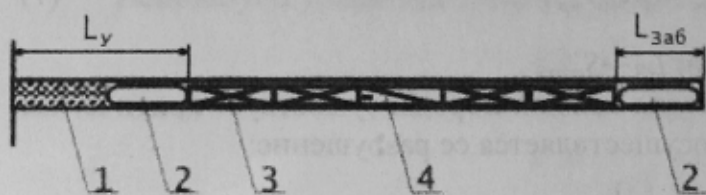
Приравнявая уравнения (9) и (11), получим:

$$\frac{2L_3}{D_y(U_{кр})} = \frac{l_y}{V_{заб}} \quad (12)$$

Тогда оптимальными длинами забоек, расположенных у устья и у дна шпура, будут забойки, длины которых определяются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} l_{заб} &= l_{ВВ} \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_g}} + L_3 \\ l_{уст} &= \frac{2l_3 V_{заб}}{D_y(U_{кр})} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

что позволяет рекомендовать конструкцию заряда, которая показана на рис. 8.



**Рис. 8.** Рекомендуемая конструкция заряда: 1 — запирающая песчано-глиняная забойка, 2 — гидрзабойка расчетной длины, 3 — пассивный патрон, 4 — патрон-боевик

забойка, заряд ВВ, устьевая гидрзабойка, запирающая песчано-глиняная забойка. Причем оптимальным является среднее инициирование заряда. Это обеспечивает одновременное действие продуктов детонации на забойки и обеспечивает встречу отраженных от запирающей песчано-глиняной забойки и от дна шпура волн в центре шпура, тем самым повышая общую эффективность действия заряда ВВ за счет увеличения времени запираения в шпуре его продуктов взрыва.

3. Длина устьевой гидрзабойки зависит от длины донной гидрзабойки. Она выбирается равной величине согласно расчета по уравнению (13).

4. Данную работу необходимо продолжить в направлении определения оптимальных длин устьевой и донной гидрзабойки в зависимости от параметров заряда и типа ВВ.

### Библиографический список

1. Шевцов Н.Р., Лабинский К.Н., Калякин С.А. Основы теории гидровзрывания при разрушении пород // Проблемы гірського тиску. Під заг. ред. О.А. Мінаєва. — Донецьк, ДонНТУ, 2002. — С. 59–84.
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. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В.Аметисов, В.А.Григорьев, Б.Т.Емцев, А.В.Клименко и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. — М.: Энергоиздат, 1982. — 512 с.
4. Коул Р. Подводные взрывы. — М.: Иностран. литерат., 1950. — 490 с.