

УДК 622.235.213

**Кантор Вениамин Хаимович**  
генеральный директор,  
ООО НТФ «ВЗРЫВТЕХНОЛОГИЯ»,  
105203, г. Москва, ул. 14-я Парковая, 8  
e-mail: [vzrivtechnology@mail.ru](mailto:vzrivtechnology@mail.ru)

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ И  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ  
ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ  
ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЗРЫВЕ  
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

*Аннотация:*

Приведена методика оценки взрывотехнических параметров ВВ и их взрывной эффективности при идеальном детонационном процессе развития взрыва. Рассмотрены вопросы проведенных аналитических исследований по обоснованию параметров промежуточных детонаторов различного диаметра. Выполнено сравнение порошкообразных, эмульсионных патронированных и литых тротильных шашек детонаторов. Показано, что детонационные характеристики промежуточного детонатора имеют достаточно ограниченное влияние на развитие детонационного процесса в скважинных зарядах ВВ по сравнению с влиянием его массогабаритных параметров. Диаметр промежуточного детонатора преимущественно определяет численные значения полного детонационного импульса и полной энергии активной массы заряда.

*Ключевые слова:* промежуточный детонатор, скорость детонации, теплота взрыва, взрывчатое вещество, заряд, горные породы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.014

**Kantor Veniamin Kh.**  
General Director,  
NTF Explosion Technology,  
105203 Moscow, 8 in 14th Parkovaya Str.  
e-mail: [vzrivtechnology@mail.ru](mailto:vzrivtechnology@mail.ru)

**EVALUATION OF OPERABILITY  
AND DETERMINATION OF OPTIMAL  
PARAMETERS OF EMULSION EXPLOSIVE  
BOREHOLE CHARGES DURING  
EXPLOSION IN ROCK MASS**

*Abstract:*

The article presents a methodology of assessing the explosive technical parameters of explosive materials and their explosive effectiveness in an ideal detonation process of explosion development. It considers the issues of analytical studies conducted to substantiate the parameters of intermediate detonators of various diameters. A comparison of powdered, emulsion-chambered and cast TNT blocks of detonators has been carried out. It is shown that the detonation characteristics of the intermediate detonator have quite limited effect on the detonation process of downhole explosive charges compared with the influence of its mass and size parameters. The diameter of the intermediate detonator mainly determines the numerical values of the total detonation pulse and the total energy of the active mass of the charge.

*Key words:* intermediate detonator, detonation velocity, explosion heat, explosives, charge, rocks.

При использовании различных видов взрывчатых веществ (ВВ) в производственной практике возникает необходимость определения численных значений относительной работоспособности для сравнительной оценки их эффективности и расчета параметров скважинных зарядов при отбойке горных пород.

Относительную работоспособность различных ВВ в горных породах для обеспечения одинакового механического эффекта взрыва (дробление, разрыхление, выброс) принято характеризовать коэффициентом взрывной эффективности ВВ –  $K_{ВВ}$  [1], иногда называемым переводным коэффициентом, определяемым как отношение масс эквивалентных зарядов сравниваемых ВВ:

$$K_{ВВ} = Q/Q_э, \quad (1)$$

где  $Q$ ,  $Q_э$  – массы применяемого и эталонного ВВ, кг.

Для практических расчетов параметров зарядов ВВ используют при определении  $K_{ВВ}$  вместо массы ВВ их эквивалентные значения, отнесенные к единице объема взрываемых пород, – удельные расходы применяемого  $q$  и эталонного  $q_э$  ВВ [1, 7]:

$$K_{ВВ} = q/q_э. \quad (2)$$

Исходя из равенства энергий применяемого и эталонного ВВ  $QQ_{ВЗР} = Q_эQ_{ВЗР}^э$ , коэффициент взрывной эффективности ВВ обычно вычисляется по отношению удельных теплот взрыва этих ВВ [9]:

$$K_{ВВ} = Q/Q_э = Q_{ВЗР}^э/Q_{ВЗР}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{взр}}$ ,  $Q_{\text{взр}}^0$  – удельные теплоты взрыва применяемого и эталонного ВВ, ккал/кг.

Поскольку теплоты взрыва ВВ зависят только от их химического состава, то при взрывах в горных породах на коэффициент взрывной эффективности  $K_{\text{ВВ}}$  для обеспечения сопоставимого механического эффекта их дробления и перемещения должны оказывать влияние как свойства горных пород, так и взрывотехнические параметры заряда ВВ – плотность, скорость детонации, объем газов. Поэтому  $K_{\text{ВВ}}$ , определенный по теплоте взрыва, является приближенной оценкой реальной работоспособности ВВ при разрушении горных пород для обеспечения требуемого действия взрыва.

Выделяющаяся при взрыве тепловая энергия преобразуется в механическую работу, совершаемую расширяющимися продуктами взрыва (ПВ).

При идеальном процессе – отсутствии термодинамических потерь – имеет место адиабатический процесс расширения продуктов взрыва (ПВ), не сопровождающийся теплообменом с окружающей средой. В условиях взрывания наиболее близкими к адиабатическому процессу является взрыв ВВ в воздушной среде. В горных породах термодинамические потери возрастают. При этом они существенно выше в пористых и хрупких легкодробимых породах и минимальны в пластичных средах.

Мерой идеальной работоспособности ВВ служит максимальная работа, которую совершают ПВ при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды (воздушной, водной, горной), т.е. когда остаточное давление ПВ уравнивается противодавлением среды – прочностным ее сопротивлением [9].

Идеальная работоспособность ВВ является одной из важнейших энергетических характеристик ВВ, показывая наряду с теплотой взрыва теоретическую возможность реализации энергетического потенциала ВВ в механическую работу – дробление, разрыхление, перемещение горных пород.

Идеальная работоспособность (полная работа, работа расширения газов взрыва)  $A$  по первому закону термодинамики определяется по формуле [2, 8]:

$$A = Q_{\text{взр}} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_n} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{взр}}$  – полная тепловая энергия (теплота взрыва), ккал/кг;  $P_0$  – начальное давление газов взрыва, кбар;  $P_n$  – давление в камуфлетной полости, соответствующее предельному сопротивлению среды (прочностная характеристика) в условиях всестороннего сжатия горных пород образованной полости, кбар;  $\gamma$  – эффективный показатель адиабаты.

Данное уравнение определяет максимальную работу продуктов взрыва при адиабатическом их расширении до прочностного сопротивления окружающей среды и может использоваться для практической оценки реальной работоспособности ВВ в горных породах.

Показатель адиабаты  $\gamma$  на завершающей стадии расширения ПВ (газовой полости) до прочностного сопротивления среды обычно принимается в пределах  $\gamma=1,2 \div 1,4$ . Для расчетов остаточного сопротивления среды при расширении ПВ эффективный показатель адиабаты рекомендуется (Родионов В.Н.) принимать постоянным и равным  $\gamma=1,25$ .

Согласно теоретическим исследованиям [3] предельное давление газов в полости  $P_0$ , соответствующее прочности окружающей среды, составляет при квазистатическом расширении камуфлетной газовой полости в хрупкой среде:

$$P_0 = \sigma_c \left( \frac{E}{(K+1)\sigma_c} \right)^{\frac{1}{K+1}} = \frac{\sigma_c}{[(K+1)E]^{1/(K+1)}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_c$  – предел прочности среды на одноосное сжатие;  $E$  – модуль продольной деформации среды;  $\varepsilon$  – продольная деформация среды;  $K$  – показатель, характеризующий условия воздействия нагрузки при расширении полости в прочной среде ( $K=2$  – несжимаемая среда дробленого материала,  $K<2$  – разрыхление среды,  $K>2$  – уплотнение среды).

В условиях всестороннего сжатия, по данным Мосинца В.Н. [4], прочность твердых тел может повышаться в 10 – 12 раз.

При уплотнении твердой упругой прочной среды под воздействием ПВ на стенки полости ( $K > 2$ ) предельное давление газов взрыва, согласно оценочным расчетам по формуле (5), может превышать сопротивление раздавливанию в 4 – 6 раз, составляя в среднем  $P_0 = 5\sigma_c$ . Приравнивая полную идеальную энергию взрыва заряда эталонного ВВ  $Q_{\text{ВВ}}^{\text{э}}$  к идеальной энергии взрыва применяемого ВВ  $Q_{\text{ВВ}}$ , имеем очевидное энергетическое равенство:

$$A_{\text{э}} Q_{\text{э}} = A Q. \quad (6)$$

Коэффициент взрывной эффективности ВВ  $K_{\text{ВВ}}$  как характеристика полной механической работы взрыва эквивалентных зарядов, массы которых обеспечивают одинаковое разрушение горных пород, находится из соотношения:

$$K_{\text{ВВ}} = Q/Q_{\text{э}} = \frac{A_{\text{э}}}{A}. \quad (7)$$

Для эталонного и применяемого ВВ полная идеальная работа процесса адиабатического расширения газовой полости может быть представлена в виде выражений:

$$A_{\text{э}} = Q_{\text{ВВ}}^{\text{э}} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{\text{э}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]; \quad (8)$$

$$A = Q_{\text{ВВ}} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_{\text{н}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right],$$

где  $P_{\text{э}}$ ,  $P_{\text{н}}$  – начальное давление газов взрыва для эталонного и применяемого ВВ соответственно, кбар.

Расчетная формула для коэффициента взрывной эффективности ВВ  $K_{\text{ВВ}}$ , определяющего относительную работоспособность ВВ в горной породе по идеальной работе взрыва при постоянном показателе адиабаты  $\gamma = 1,25$ , имеет следующий вид:

$$K_{\text{ВВ}} = \frac{Q}{Q_{\text{э}}} = \frac{Q_{\text{ВВ}}^{\text{э}}}{Q_{\text{ВВ}}} \left[ \frac{1 - (P_0/P_{\text{э}})^{0,2}}{1 - (P_0/P_{\text{н}})^{0,2}} \right]. \quad (9)$$

Прочностное сопротивление горных пород  $P_0 = 5\sigma_c$  может быть для упрощения расчетов выражено как функция коэффициента крепости пород  $f$  по шкале профессора М.М. Протодяконова:

$$P_0 = 0,5f, \text{ кбар}. \quad (10)$$

Начальное давление газов взрыва в скважине принимается усредненно  $P_{\text{н}} = P_{\text{ВВ}}/2$ , где  $P_{\text{ВВ}}$  – детонационное давление при взрыве заряда ВВ.

Для вычисления детонационного давления ВВ обычно используется общепринятая теоретическая зависимость [5]:

$$P_{\text{ВВ}} = 10 \frac{\rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}^2}{(n+1)}, \text{ кбар}, \quad (11)$$

где  $\rho_{\text{ВВ}}$  – плотность ВВ, г/см<sup>3</sup>;  $D_{\text{ВВ}}$  – скорость детонации ВВ, км/с;  $n$  – показатель политроны.

Для промышленных ВВ диапазон значений показателя политроны изменяется в достаточно широких пределах  $n = 1,5 \div 3,5$ .

Неопределенность выбора значений показателя политропы для различных ВВ затрудняет использование уравнения (11) для практических расчетов детонационного давления. В этой связи целесообразно воспользоваться формулами для экспресс-расчетов детонационного давления  $P_{\text{д}}$  (кбар) и соответствующей ему идеальной скорости детонации ВВ  $D_{\text{и}}$  (м/с):

$$P_{\text{д}} = 9 * 10^{-6} (D_{\text{и}} - 2641)^2 + 15,96, \text{ кбар}; \quad (12)$$

$$D_{\text{и}} = 2641 + 3,231 \rho_{\text{ВВ}} \sqrt{Q_{\text{ВВ}} V_{\text{г}}}, \text{ м/с}, \quad (13)$$

где  $Q_{\text{ВВ}}$  – теплота взрыва, ккал/кг;  $V_{\text{г}}$  – удельный объем газов взрыва, л/кг;  $\rho_{\text{ВВ}}$  – плотность ВВ, г/см<sup>3</sup>.

Проведем численную оценку относительной работоспособности эмульсионного взрывчатого вещества в сравнении с ВВ другого типа по величине коэффициента взрывной эффективности  $K_{\text{ВВ}}$  в соответствии с предложенной методикой. В качестве эталонного ВВ примем порошкообразный аммонит 6ЖВ. Определим  $K_{\text{ВВ}}$  для наиболее стан-

дартного эмульсионного ВВ в виде химически газифицированной матрицы и простейшего гранулированного ВВ на основе аммиачной селитры и жидкого нефтепродукта типа ANFO, сбалансированного по кислородному балансу.

В табл. 1 приведены основные исходные термодинамические параметры ВВ, необходимые для расчета коэффициента  $K_{ВВ}$  по формуле (9). Для вычисления начального давления  $P_n$  в зарядной выработке использовалось значение детонационного давления  $P_d$  по формуле (12).

В табл. 2 приведены результаты расчета  $K_{ВВ}$  для горных пород с существенно различными коэффициентами крепости  $f$ , характеризующие их прочностное сопротивление  $P_0$  в соответствии с выражением (9) в условиях идеального детонационного процесса.

В табл. 3 и 4 приведены термодинамические параметры ВВ и соответствующие им расчетные значения при идеальном детонационном процессе коэффициента  $K_{ВВ}$  для наиболее распространенных (типовых) смесевых составов эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) – эмульсионной матрицы и гранулированного AN-FO (твердая фаза) в процентном соотношении, соответственно (по массе), – 30/70, 50/50 и 70/30.

Таблица 1

**Взрывотехнические параметры ВВ для расчета  $K_{ВВ}$  при идеальном детонационном процессе развития взрыва**

Параметры ВВ	Тип ВВ		
	Аммонит 6ЖВ (эталон)	ANFO	ЭВВ*)
$\rho_{ВВ}$ , г/см <sup>3</sup>	1,0	0,85	1,25/(1,15)
$Q_{ВЗР}$ , ккал/кг	1000	900	700
$V_G$ , л/кг	890	910	1000
$P_d$ , кбар	84	72	118/(102)
$D_{и}$ , м/с	5689	5126	6020/(5750)

Таблица 2

**Коэффициенты взрывной эффективности ВВ  $K_{ВВ}$  при идеальном детонационном процессе развития взрыва**

Характеристика прочности пород $f$	Тип ВВ		
	Аммонит 6ЖВ (эталон)	ANFO	ЭВВ*)
5	1,0	1,158	1,313/1,360
10	1,0	1,181	1,271/1,340
20	1,0	1,228	1,195/1,128

\*) – числитель для плотности ЭВВ 1,25 г/см<sup>3</sup>, знаменатель для 1,15 г/см<sup>3</sup>.

Таблица 3

**Взрывотехнические параметры смесевых ЭВВ для расчета  $K_{ВВ}$  при идеальном детонационном процессе развития взрыва**

Параметры ЭВВ	Состав ЭВВ (ЭМ/AN-FO), %		
	30/70	50/50	70/30
$\rho_{ВВ}$ , г/см <sup>3</sup>	1,15	1,20	1,25
$Q_{ВЗР}$ , ккал/кг	850	800	750
$V_G$ , л/кг	1000	1000	1000
$P_d$ , кбар	122	124	126
$D_{и}$ , м/с	6066	6108	6138

Таблица 4

**Коэффициенты взрывной эффективности смесевых ЭВВ при идеальном детонационном процессе развития взрыва**

Характеристика прочности пород $f$	Состав ЭВВ (ЭМ/ANFO), %		
	30/70	50/50	70/30
5	1,08	1,138	1,207
10	1,037	1,085	1,163
20	0,968	1,022	1,082

При скорости детонации заряда  $D_{ВВ} < D_{и}$  (режим неидеальной детонации), определяемой диаметром заряда  $d_{ВВ}$ , происходит снижение детонационного давления в соответствии с зависимостью:

$$P_{ВВ} = P_{д} \left( \frac{D_{ВВ}}{D_{и}} \right)^2, \text{ кбар.} \quad (14)$$

В качестве примера для параметров (табл. 5) выполнен расчет коэффициента взрывной эффективности  $K_{ВВ}$  для ЭВВ и ANFO применительно к условиям развития процесса взрыва в неидеальном режиме со скоростями детонации ВВ  $D_{ВВ}$  для скважинных зарядов диаметром  $d_{ВВ} = 200 \div 220$  мм.

Таблица 5

**Взрывотехнические параметры ВВ для расчета  $K_{ВВ}$  при неидеальном детонационном процессе развития взрыва**

Параметры ВВ	Тип ВВ		
	Аммонит 6ЖВ (эталон)	ANFO	ЭВВ*)
$\rho_{ВВ}, \text{ г/см}^3$	1,0	0,85	1,25/(1,15)
$Q_{взр}, \text{ ккал/кг}$	1000	900	700
$V_{г}, \text{ л/кг}$	890	910	1000
$D_{и}, \text{ м/с}$	5689	5126	6020/(5750)
$D_{ВВ}, \text{ м/с}$	4800	4200	5200/4800
$P_{д}, \text{ кбар}$	84	72	118/(102)
$P_{ВВ}, \text{ кбар}$	60	48	88/70

Таблица 6

**Коэффициенты взрывной эффективности ВВ  $K_{ВВ}$  при неидеальном детонационном процессе развития взрыва**

Характеристика прочности пород $f$	Тип ВВ		
	Аммонит 6ЖВ (эталон)	ANFO	ЭВВ*)
5	1,0	1,195	1,282/1,366
10	1,0	1,242	1,222/1,336
20	1,0	1,367	1,095/1,268

\*) – числитель для плотности ЭВВ 1,25 г/см<sup>3</sup>, знаменатель для 1,15 г/см<sup>3</sup>.

Анализ выполненных расчетов коэффициента взрывной эффективности  $K_{ВВ}$  для ЭВВ в горных породах различной крепости по формуле (9) показывает, что при постоянной плотности ВВ относительная работоспособность (эталон-аммонит 6ЖВ) с ростом прочности горных пород снижается как при идеальном, так и при неидеальном режиме развития детонационного процесса в скважинных зарядах (табл. 2, 6). При этом с ростом

прочности пород коэффициент  $K_{\text{ВВ}}$  снижается более интенсивно при взрыве ЭВВ с большей плотностью  $\rho_{\text{ВВ}}$  и, соответственно, большей скоростью детонации  $D_{\text{ВВ}}$ . Следовательно, при разрушении твердой среды взрывом плотность и скорость детонации ЭВВ энергетически выгодно повышать при росте прочности пород для снижения величины  $K_{\text{ВВ}}$ , соответствующего увеличению относительной работоспособности ЭВВ.

Применительно к низкоплотным гранулированным ВВ типа ANFO при расчете  $K_{\text{ВВ}}$  по формуле (9) наблюдается противоположная тенденция (см. табл. 6). С ростом крепости пород коэффициент  $K_{\text{ВВ}}$  повышается, что обусловливается более высоким детонационным давлением эталонного ВВ (аммонит 6ЖВ), чем у применяемого ANFO.

Снижение величины коэффициента  $K_{\text{ВВ}}$  с увеличением крепости пород при постоянной плотности и скорости детонации имеет место не только для ЭВВ на основе газифицированной матрицы, но и для смесевых составов ЭВВ с твердой фазой гранулированного ANFO (см. табл. 4). При этом с повышением содержания в смесевых составах ЭВВ эмульсионной матрицы при постоянной крепости пород растет величина  $K_{\text{ВВ}}$ , что соответствует снижению работоспособности ЭВВ по разрушающему действию взрыва в горных породах.

Определение относительной работоспособности ВВ при взрыве в горных породах по идеальной работе взрыва в соответствии с формулой (9) позволяет при определении коэффициента взрывной эффективности  $K_{\text{ВВ}}$  комплексно учесть не только прочностные характеристики разрушаемой твердой среды, но и все основные взрыво-технические параметры зарядов, такие как плотность, скорость детонации, объем газов, теплота взрыва ВВ и диаметр заряда.

Оценка относительной работоспособности ВВ только по теплоте взрыва, согласно формуле (3), не позволяет в реальных горных породах определить необходимые энергозатраты для расчета параметров скважинного заряда для получения сопоставимых результатов по механическому (разрушающему) эффекту взрыва.

Практический интерес представляет возможность управления параметрами взрывной отбойки горных пород скважинными зарядами ЭВВ за счет регулирования скорости детонации при изменении их плотности в процессе химической газификации эмульсионной матрицы.

Теоретические исследования взаимосвязи геометрических параметров скважинных зарядов ЭВВ от их полного бокового детонационного импульса при уступной отбойке горных пород позволили установить функциональную связь радиуса действия удлиненного цилиндрического заряда ВВ со скоростью детонации  $D_{\text{ВВ}}$ , плотностью ВВ  $\rho_{\text{ВВ}}$  и горных пород  $\rho_{\text{Г}}$ .

Формула определения величины оптимального сопротивления  $W$  по подошве уступа (радиуса разрушения  $r_{\text{р}}$ ) для скважинного удлиненного заряда ЭВВ, обеспечивающего проработку и полный отрыв породы по проектной отметке подошвы, имеет следующий вид:

$$W = 5d_{\text{ВВ}} \sqrt{D_{\text{ВВ}} \frac{\rho_{\text{ВВ}} \sigma_{\text{с}}}{\rho_{\text{Г}} \sigma_{\text{р}}}}, \text{ м}, \quad (15)$$

где  $d_{\text{ВВ}}$  – диаметр скважины, м;  $D_{\text{ВВ}}$  – скорость детонации ВВ в диаметре заряда  $d_{\text{ВВ}}$  при плотности  $\rho_{\text{ВВ}}$ , км/с;  $\rho_{\text{ВВ}}$ ,  $\rho_{\text{Г}}$  – плотности ВВ в скважине и взрывааемых горных пород, г/см<sup>3</sup>;  $\sigma_{\text{с}}$ ,  $\sigma_{\text{р}}$  – пределы прочности пород на сжатие и растяжение, МПа.

Глубина перебура  $l_{\text{п}}$  ниже подошвы уступа при заданной величине  $W$  зависит от скорости детонации ЭВВ  $D_{\text{ВВ}}$  и хрупкости пород, определяемой соотношением пределов ее прочности на сжатие  $\sigma_{\text{с}}$  и растяжение  $\sigma_{\text{р}}$ .

Используя представления об импульсном воздействии торцевой части скважинного заряда на сдвигение объема породы, расположенного ниже уровня подошвы уступа, получена теоретическая формула для определения глубины перебура, учитывающая скорость детонации ЭВВ, прочностные характеристики пород и диаметр скважинного заряда:

$$l_{\Pi} = 0,33d_{\text{ВВ}}K_n(1 + 28\sqrt{D_{\text{ВВ}}\frac{\sigma_{\text{p}}}{\sigma_{\text{c}}}}), \text{ м}, \quad (16)$$

где  $K_n = \frac{\binom{n+1}{n}^n}{n-1}$  – безразмерный множитель, определяемый значением показателя политропы  $n$  взрывчатого вещества.

Расчетная величина показателя политропы при идеальном детонационном процессе определяется из известных соотношений гидродинамической теории детонации конденсированных ВВ:

$$n = 1 + \frac{50P_{\text{д}}}{\rho_{\text{ВВ}}Q_{\text{взр}}}, \quad (17)$$

где  $\rho_{\text{ВВ}}$  – плотность ВВ, г/см<sup>3</sup>.

Величина забойки  $l_{\text{заб}}$  скважинного заряда ВВ зависит от его диаметра и связана с детонационными характеристиками ВВ ( $D_{\text{ВВ}}$ ,  $\rho_{\text{ВВ}}$ ), соотношением прочностных показателей горных пород  $\frac{\sigma_{\text{c}}}{\sigma_{\text{p}}}$ , а также акустической жесткостью забоечного материала ( $\rho_3 D_3$ ) теоретической формулой:

$$l_{\text{заб}} = 4d_{\text{ВВ}}K_{\text{д}}\frac{\rho_{\text{ВВ}}D_{\text{ВВ}}}{\rho_3 D_3}(1 + 28\sqrt{D_{\text{ВВ}}\frac{\sigma_{\text{p}}}{\sigma_{\text{c}}}}), \text{ м}, \quad (18)$$

где  $K_{\text{д}} = \frac{\binom{n+1}{n}^n}{n^2 - 1}$ .

Выполненные исследования выявили существенное влияние скорости детонации ВВ на величину оптимального интервала замедления взрыва смежных скважинных зарядов (групп зарядов) ВВ при отбойке горных пород.

Оптимальное время замедления взрыва скважинными зарядами ВВ в ряду  $t_3$  для эффективного дробления горных пород определяется условием нагружения разрушаемого массива до предельно-напряженного состояния, соответствующего максимальному времени расширения газовой полости в камуфлетной фазе развития взрыва [12]:

$$t_3 = \frac{6K_{\text{p}}\rho_{\text{r}}D_{\text{ВВ}}}{f}W, \text{ мс}, \quad (19)$$

где  $K_{\text{p}}$  – коэффициент разрыхления взорванной горной массы;  $f$  – коэффициент крепости горных пород по М.М. Протодыяконову;  $\rho_{\text{r}}$  – плотность горных пород, г/см<sup>3</sup>;  $W$  – расстояние до свободной поверхности (сопротивление по подошве уступа), м;  $D_{\text{ВВ}}$  – скорость детонации скважинного заряда, км/с.

Оптимальное время замедления взрыва между рядами скважинных зарядов ВВ  $t_{\text{p}}$  рекомендуется рассчитывать по формуле (20):

$$t_{\text{p}} = t_3\sqrt{1 + \left(\frac{b}{\alpha}\right)^2}, \text{ мс}, \quad (20)$$

где  $b$  – расстояние между рядами зарядов ВВ, м;  $\alpha$  – расстояние между зарядами ВВ в ряду, м.

Формула (19) показывает, что при заданных  $W$  и  $f$  интервал КЗВ должен пропорционально увеличиваться с повышением не только интенсивности разрыхления пород  $K_{\text{p}}$ , их плотности  $\rho_{\text{r}}$ , но и скорости детонации ВВ в скважине  $D_{\text{ВВ}}$ . Следует отметить, что скорость детонации ВВ  $D_{\text{ВВ}}$  является одним из определяющих факторов влияния на управление процессом замедления при взрыве зарядов ВВ и на эффект дробления пород взрывом.

Приведенные формулы определения основных параметров скважинных зарядов при уступной отбойке горных пород ( $W$ ,  $l_{\text{п}}$ ,  $l_{\text{заб}}$ ,  $t_3$ ) требуют предварительного определения скорости детонации ВВ, зависящей от множества факторов и, в первую очередь, от диаметра скважины, плотности ВВ, величины инициирующего импульса промежуточного детонатора, наличия забойки, определяющей продолжительность действия продуктов детонации и длительностью поддержания их давления.

Предложенная методика определения оптимальных параметров буровзрывных работ (БВР) в зависимости от скорости детонации ЭВВ  $D_{\text{ВВ}}$  и их плотности в скважине  $\rho_{\text{ВВ}}$  позволяет производить на принципах подобия определение основных геометрических параметров при изменении детонационных характеристик ЭВВ.

Изменение плотности ЭВВ, регулируемой за счет химической газификации эмульсии, приводит к изменению скорости детонации ЭВВ в скважине постоянного диаметра. Для сохранения неизменной степени дробления горной массы необходимо производить пересчет параметров скважинного заряда с известных параметров, обозначенных индексом «1», на новые значения - с индексом «2» по следующей системе формул:

$$d_{\text{ВВ}} = \text{const}; i = \text{const}$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ВВ}2} D_{\text{ВВ}2}}{\rho_{\text{ВВ}1} D_{\text{ВВ}1}}} \quad \frac{l_{3\alpha 62}}{l_{3\alpha 61}} = \frac{\rho_{\text{ВВ}2} D_{\text{ВВ}2}}{\rho_{\text{ВВ}1} D_{\text{ВВ}1}} \sqrt{\frac{D_{\text{ВВ}2}}{D_{\text{ВВ}1}}}$$

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\rho_{\text{ВВ}1} D_{\text{ВВ}1}}{\rho_{\text{ВВ}2} D_{\text{ВВ}2}} \quad \frac{t_{32}}{t_{31}} = \frac{D_{\text{ВВ}2}}{D_{\text{ВВ}1}}$$

$$\frac{l_{\text{П}2}}{l_{\text{П}1}} = \sqrt{\frac{D_{\text{ВВ}2}}{D_{\text{ВВ}1}}} \quad (21)$$

$$D_{\text{ВВ}2} = D_{\text{ВВ}1} + M(\rho_{\text{ВВ}2} - \rho_{\text{ВВ}1}), \text{ м/с}$$

$$M = 3,231 \sqrt{Q_{\text{ВЗР}} V_{\text{Г}}}$$

При постоянной плотности эмульсионных ВВ  $\rho_{\text{ВВ}}$  в скважинах различного диаметра  $d_{\text{ВВ}}$  скорость детонации  $D_{\text{ВВ}}$  возрастает до определенного предела по мере роста  $d_{\text{ВВ}}$ , что вызывает изменение степени дробления горной массы  $i$ . При постоянной плотности ЭВВ  $\rho_{\text{ВВ}}$  рост диаметра скважин  $d_{\text{ВВ}}$  приводит к снижению степени дробления  $i$  взорванной горной массы в соответствии с зависимостью

$$i_2 = i_1 \frac{D_{\text{ВВ}2} d_{\text{ВВ}1}}{D_{\text{ВВ}1} d_{\text{ВВ}2}}; \quad (22)$$

$$\rho_{\text{ВВ}1} = \rho_{\text{ВВ}2}$$

Сравнительную оценку влияния изменения диаметра скважинного заряда ЭВВ на степень дробления породы при постоянной плотности ВВ по формуле (22) можно показать на следующем примере:  $d_{\text{ВВ}1} = 0,2$  м;  $D_{\text{ВВ}1} = 5$  км/с,  $i_1 = 4$ . При увеличении диаметра скважины до  $d_{\text{ВВ}2} = 0,3$  м скорость детонации возрастает до  $D_{\text{ВВ}2} = 6$  км/с. При этом степень дробления пород снижается до следующего значения:

$$i_2 = 4 \cdot \frac{6}{5} \cdot \frac{0,2}{0,3} = 3,2, \text{ или на } 25 \%$$

Следовательно, при переходе на увеличенный диаметр скважин во избежание снижения степени дробления пород необходимо увеличивать скорость детонации ЭВВ за счет повышения плотности ВВ.

Практический интерес при определении эффективных параметров БВР отбойки горных пород скважинными зарядами ЭВВ представляет обоснование выбора оптимальных значений скорости детонации  $D_{\text{Опт}}$  и соответствующей ей оптимальной плотности ВВ  $\rho_{\text{Опт}}$ .

Условиями наиболее оптимального режима взрывного нагружения массива горных пород считается [4, 6] соответствие скорости детонации взрывчатого вещества и звука в горной породе:

$$D_{\text{Опт}} = D_3,$$

где  $D_{\text{Опт}}$  – оптимальная скорость детонации ВВ в скважине, м/с;  
 $D_3$  – скорость звука в горной породе, м/с.



Скорость детонации ЭВВ для заданного диаметра скважины  $d_{\text{ВВ}}$  зависит от плотности ВВ  $\rho_{\text{ВВ}}$ , регулируемой за счет химической газификации эмульсии. Если при взрыве ЭВВ с известной его плотностью  $\rho_{\text{ВВ}}$  была измерена скорость детонации в скважинном заряде диаметром  $d_{\text{ВВ}}$ , то по известной скорости звука в горной породе  $D_3$  может быть определена оптимальная плотность  $\rho_{\text{опт}}$ , соответствующая условию по следующей формуле:

$$\rho_{\text{опт}} = \rho_{\text{ВВ}} + 0,3 \frac{(D_3 - D_{\text{ВВ}})}{\sqrt{Q_{\text{взр}} V_{\text{Г}}}}, \text{ г/см}^3, \quad (23)$$

где  $D_{\text{ВВ}}$  – измеренная в скважинном заряде ЭВВ скорость детонации при плотности  $\rho_{\text{ВВ}}$ , м/с;  $Q_{\text{взр}}$  – теплота взрыва ЭВВ, ккал/кг;  $V_{\text{Г}}$  – объем газообразных продуктов взрыва ЭВВ, л/кг.

Приведем пример определения оптимальной плотности  $\rho_{\text{опт}}$  по уравнению (23) для следующих условий:

$$\rho_{\text{ВВ}} = 1,1 \text{ г/см}^3; D_{\text{ВВ}} = 5200 \text{ м/с}; Q_{\text{взр}} = 700 \text{ ккал/кг}; V_{\text{Г}} = 1000 \text{ л/кг}.$$

Породе со скоростью звука  $D_3 = 5500$  м/с должна соответствовать оптимальная скорость детонации ЭВВ, равная  $D_{\text{опт}} = 5500$  м/с, для обеспечения которой требуется за счет газификации эмульсионной матрицы иметь следующую плотность:

$$\rho_{\text{опт}} = 1,10 + 0,3 \frac{(5500 - 5200)}{\sqrt{700 * 1000}} = 1,208 \text{ , г/см}^3.$$

Если скорость звука в горной породе  $D_3 = 5000$  м/с, то ей будет соответствовать оптимальная скорость детонации ЭВВ, равная  $D_{\text{опт}} = 5000$  м/с, с плотностью взрывчатого состава

$$\rho_{\text{опт}} = 1,10 + 0,3 \frac{(5000 - 5200)}{\sqrt{700 * 1000}} = 1,028 \text{ , г/см}^3.$$

Надежное возбуждение нормальной детонации в скважинном заряде ВВ осуществляется за счет инициирующего импульса промежуточного детонатора (ПД), определяемого массой, диаметром, длиной ПД и типом ВВ, используемом в ПД.

Экспериментально установлено, что масса и геометрические размеры промежуточного детонатора существенно влияют на изменение скорости детонации на участке выхода детонационного процесса на стационарный режим детонации с постоянной скоростью и определяют, в конечном счете, стабильность распространения фронта детонации по всей длине колонки заряда ВВ.

На рис. 1 и 2, по данным [7], приведены графики изменения скорости детонации скважинных зарядов взрывчатых смесей типа ANFO диаметром 229 и 270 мм в зависимости от массы и скорости детонации промежуточных детонаторов. Изменение скорости детонации промежуточного детонатора от 3150 до 5734 м/с (в 1,82 раза) при постоянном их размере не оказывает никакого практического влияния на численное значение скорости детонации инициируемого заряда ВВ диаметром 270 мм по всей длине участка разгона детонации до стационарного значения.

Из графика на рис. 2 видно, что стационарная скорость детонации в заряде ВВ может быть достигнута промежуточными детонаторами массой от 0,45 до 11,3 кг, однако только промежуточные детонаторы массой начиная примерно с 10 кг полностью исключают в зарядах ANFO диаметром 229 мм участки разгона детонации в низкоскоростном режиме.

Согласно современным научным представлениям, эффективность инициирования взрывчатых веществ с низкой ударно-волновой чувствительностью зависит исключительно от значений полного детонационного импульса, энергии и продолжительности действия так называемой активной массы заряда промежуточного детонатора [8].

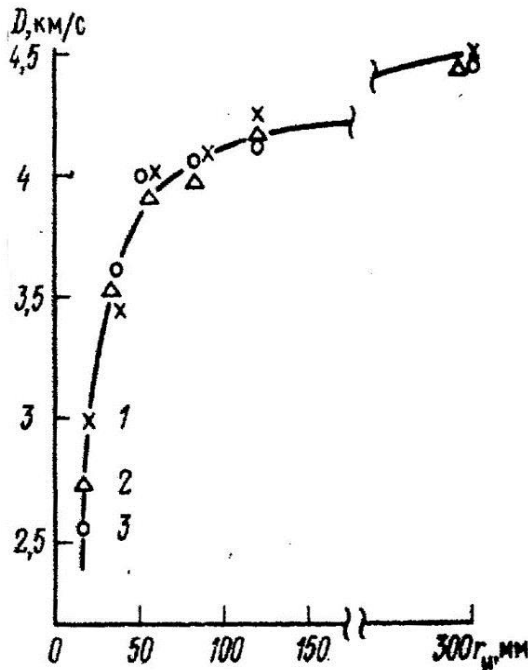


Рис. 1. Изменение скорости детонации  $D$  взрывчатой смеси АС-ДТ в зарядах диаметром 270 мм на различных расстояниях  $r_i$  от инициатора постоянного размера ( $51 \times 203$  мм), имеющих различную скорость детонации: 1 – 5734 м/с; 2 – 4133 м/с; 3 – 3150 м/с

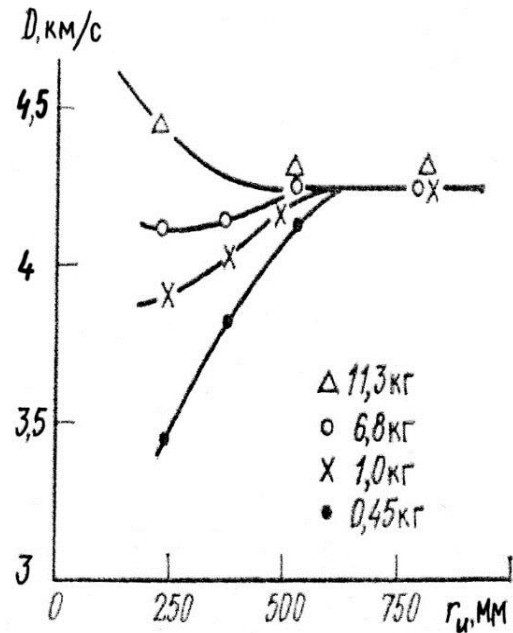


Рис. 2. Изменение скорости детонации  $D$  взрывчатой смеси АС-ДТ в заряде диаметром 229 мм в зависимости от массы инициатора и расстояния до инициатора  $r_i$

Активная масса заряда ПД  $M_D^A$  при его длине  $H_D \geq 2,25 d_D$  определяется только диаметром  $d_D$  (м) и плотностью  $\rho_D$  (кг/м<sup>3</sup>) заряда:

$$M_D^A = \frac{\pi}{12} d_D^3 \rho_D, \text{ кг.} \quad (24)$$

Для ПД с длиной  $H_D < 2,25 d_D$  их активная масса  $M_D^A$  вычисляется по теоретической зависимости:

$$M_D^A = \pi \rho_D d_D^2 \left( \frac{1}{9} H_D - \frac{4}{81} \frac{H_D^2}{d_D} + \frac{16}{2187} \frac{H_D^3}{d_D^2} \right), \text{ кг.} \quad (25)$$

Полный детонационный импульс ПД, действующий на иницируемый заряд ВВ, взаимосвязан с активной массой ПД  $M_D^A$  (кг) и скоростью его детонации  $D_D$  (м/с) теоретической формулой:

$$I_D = K_D M_D^A D_D, \text{ кг*м/с;} \quad (26)$$

$$K = \frac{\left(\frac{n+1}{n}\right)^n}{n^2-1},$$

где  $n$  – показатель политропы, зависящий от плотности  $\rho_D$  ПД.

Полная энергия активной массы заряда  $E_D$  наряду с импульсом  $I_D$  является важнейшим показателем, определяющим сравнительную эффективность иницирующей способности различных типов ПД:

$$E_D = \frac{M_D^A D_D^2}{2(n^2-1)}. \quad (27)$$

Продолжительность действия иницирующей ударной волны определяется активной массой и скоростью детонации взрывчатого вещества ПД в соответствии с формулой

$$t_D = \frac{2M_D^A}{D_D(n-1)}. \quad (28)$$

Таким образом, сравнительная оценка инициирующей способности промежуточных детонаторов различного размера (диаметра), массы, плотности и скорости детонации может производиться исходя из величины полного импульса  $I_d$  и энергии  $E_d$  активной массы  $M_d^A$  ПД.

В табл. 7 приведены сравнительные расчетные данные по оценке инициирующей способности промежуточных детонаторов из пентолитовых шашек-детонаторов ПТ-П750, патронированного ЭВВ Нитронит П и нового типа низкоплотных порошкообразных промежуточных детонаторов из гранулита РП большого диаметра и массы согласно изложенным теоретическим представлениям.

Таблица 7

**Сравнительные параметры промежуточных детонаторов**

Тип ПД	$d_d$ , мм	$Q_d$ , кг	$H_d$ , м	$\rho_d$ , кг/м <sup>3</sup>	$U_d$ , ккал/кг	$D_d$ , м/с	$M_d^A$ , кг	$I_d$ , кгм/с	$E_d$ , ккал	$t_d$ , мкс
ПТ-750	81,5	0,75	0,105	1580	1050	7500	0,208	615	218,4	28
РП	160	6,5	0,36	900	700	4000	0,964	2893	675	482
ЭВВ	90	3,5	0,475	1200	736	5500	0,229	556	168,5	56

Из табл. 7 следует, что низкоплотный порошкообразный детонатор из гранулита РП за счет большого диаметра ПД по сравнению с ПТ-П750 и ЭВВ имеет в 4,6 - 4,7 раза большую активную массу  $M_d^A$  и соответствующий ей полный детонационный импульс  $I_d$ .

При этом полная энергия  $E_d$  активной массы заряда ПД из порошкообразного гранулита РП в 3 раза, а продолжительность ее действия  $t_d$ , соответственно, в 8,5 и 17 раз выше, чем эти показатели у пентолитовой шашки ПТ-П750 и ЭВВ.

Несмотря на существенно более высокие детонационные и энергетические параметры, шашка ПТ-П750 и боевики из ЭВВ по способности инициировать промышленные ВВ в скважинах не имеют преимуществ перед ПД из порошкообразных низкоплотных ВВ большого диаметра и массы.

Стационарная детонация в скважинном заряде ВВ обеспечивается при соблюдении условия

$$E_d = E_{ВВ}, \quad (29)$$

где  $E_d$  – полная энергия ВВ промежуточного детонатора;  $E_{ВВ}$  – полная энергия, выделяемая при взрыве на длине участка разгона детонации заряда ВВ до стационарной скорости.

Определение диаметра промежуточного детонатора  $d_d$ , в соответствии с условием (29), производится по формуле общего вида:

$$d_d = 0,5d_{ВВ} \left(1 + \frac{D_{ВВ}}{D_d}\right) \sqrt{\frac{\rho_{ВВ} H_p}{\rho_d H_d}}, \quad (30)$$

где  $d_{ВВ}$  – диаметр заряда ВВ, м;  $D_{ВВ}$ ,  $D_d$  – скорость детонации скважинного заряда и промежуточного детонатора, м/с;  $H_p$  – длина участка разгона детонации в скважинном заряде ВВ до стационарной скорости, м;  $H_d$  – длина промежуточного детонатора, м.

Для нормального распространения детонационного процесса по длине инициируемого заряда ВВ длина участка разгона детонации должна быть в пределах  $H_p = (1-2) d_{ВВ}$ , а оптимальная длина боевика  $H_d \leq H_p$ .

Из формулы (30) следует, что оптимальные параметры боевика должны обязательно учитывать диаметр применяемых скважинных зарядов ВВ.

Безотказная детонация скважинного заряда ВВ возможна при условии инициирования ПД, имеющего диаметр  $d_d \geq d_k$ , где  $d_k$  – критический диаметр детонации скважинного заряда ВВ [13].

Приняв по данным опытных работ оптимальное условие распространения детонационного процесса в незатухающем (стационарном) режиме  $H_p/H_d = d_{ВВ}/d_d$ , расчетную формулу (30) определения диаметра промежуточного детонатора для инициирования скважинного заряда ВВ можно представить в виде выражения:

$$d_d = d_k \left( \frac{1 + \frac{D_{ВВ}}{D_d}}{1 + \frac{D_k}{D_d}} \right)^{\frac{2}{3}}, \text{ м} \quad (31)$$

где  $D_k$  – скорость детонации ВВ в критическом диаметре  $d_k$ , м/с.

Если вместо промежуточного детонатора из высокоплотного состава с высокой скоростью детонации используется, например, ПД из низкоплотного порошкообразного взрывчатого состава, то диаметр такого ПД определяется из условия равенства полных энергий их активных масс:

$$E_{di} = E_d, \quad (32)$$

где  $E_{di}$ ,  $E_d$  – полные энергии активной массы ПД из низкоплотного и высокоплотного порошкообразного состава.

С учетом формул (24 – 27) определение расчетного диаметра низкоплотного порошкообразного промежуточного детонатора может производиться по формуле:

$$d_{di} = d_d \left( \frac{D_d}{D_{di}} \right)^{2/3} \left( \frac{\rho_d}{\rho_{di}} \right)^{1/3} \left( \frac{n_i^2 - 1}{n^2 - 1} \right)^{1/3}, \quad (33)$$

где  $d_{di}$ ,  $D_{di}$ ,  $\rho_{di}$  – диаметр, скорость детонации и плотность ПД из порошкообразного или другого аналогичного взрывчатого состава, соответственно.

#### Вывод

Анализ полученных результатов инструментальных измерений скорости детонации в зарядах из гранулированных и эмульсионных ВВ подтверждает, что скорость детонации промежуточных детонаторов имеет ограниченное влияние на развитие детонационного процесса в скважинных зарядах ВВ по сравнению с влиянием массогабаритных параметров ПД. Диаметр ПД ( $d_d$ ), преимущественно определяющий численные значения полного детонационного импульса, и полная энергия активной массы заряда ПД ( $E_d$ ) – основные интегральные параметры, влияющие на эффективность инициирования скважинных зарядов промышленных ВВ.

#### Список литературы

1. Авдеев Ф.А., Барон В.А., Гуров Н.В., Кантор В.Х., 1986. *Нормативный справочник по буровзрывным работам*. Москва: Недра.
2. Андреев К.К., Беляев А.Ф., 1960. *Теория взрывчатых веществ*. Москва: Оборонгиз.
3. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др., 1971. *Механический эффект подземного взрыва*. Москва: Недра.
4. Мосинец В.Н., 1976. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. Москва: Недра.
5. Светлов Б.Я., Яременко Н.Е., 1973. *Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ*. Москва: Недра.
6. Густавсон Р., 1977. *Шведская техника взрывных работ*. Москва: Недра.
7. Барон В.Л., Кантор В.Х., 1989. *Техника и технология взрывных работ в США*. Москва: Недра.
8. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др., 1975. *Физика взрыва*. Москва: Недра.
9. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И., 1988. *Промышленные взрывчатые вещества*. Москва: Недра.

10. Лангефорс У., Кильстерм Б., 1968. *Современная техника отбойки горных пород*. Москва: Недра.
11. Юхансон К., Персон П., 1973. *Детонация взрывчатых веществ*. Москва: Мир.
12. Кантор В.Х., 2007. Принципы проектирования параметров взрывания скважинных зарядов с учетом требований по интенсивности дробления горной массы. *Взрывное дело*, № 97/54.
13. Persson P., Holmberg R., Lee J., 1994. *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press, Inc.
14. Кукиб Б.Н., Иоффе В.Б., Жученко Е.И., Фролов А.Б., 2007. О критериях оценки относительной работоспособности промышленных взрывчатых веществ. *Взрывное дело*, № 8.

### References

1. Avdeev F.A., Baron V.A., Gurov N.V., Kantor V.Kh., 1986. Normativnyi spravochnik po burovzryvnym rabotam [Normative reference book on drilling and blasting operations]. Moscow: Nedra.
2. Andreev K.K., Beliaev A.F., 1960. Teoriia vzryvchatykh veshchestv [Theory of explosives]. Moscow: Oborongiz.
3. Rodionov V.N., Adushkin V.V., Kostyuchenko V.N. i dr., 1971. Mekhanicheskii effekt podzemnogo vzryva [Mechanical effect of an underground explosion]. Moscow: Nedra.
4. Mosinets V.N., 1976. Drobyashchee i seismicheskoe deistvie vzryva v gornykh porodakh [Crushing and seismic effect of explosion in rock mass]. Moscow: Nedra.
5. Svetlov B.Ya., Yaremenko N.E., 1973. Teoriya i svoistva promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv [Theory and characteristics of industrial explosives]. Moscow: Nedra.
6. Gustavson R., 1977. Shvedskaya tekhnika vzryvnykh rabot [Swedish blast works technique]. Moscow: Nedra.
7. Baron V.L., Kantor V.Kh., 1989. Tekhnika i tekhnologiya vzryvnykh rabot v SShA [Equipment and technology of blasting works in the USA]. Moscow: Nedra.
8. Baum F.A., Orlenko L.P., Stanyukovich K.P. i dr., 1975. Fizika vzryva [Physics of explosion]. Moscow: Nedra.
9. Dubnov L.V., Bakharevich N.S., Romanov A.I., 1988. Promyshlennye vzryvchatye veshchestva [Industrial explosive materials]. Moscow: Nedra.
10. Langefors U., Kil'sterm B., 1968. Sovremennaya tekhnika otboiki gornykh porod [Modern technique of rock breaking]. Moscow: Nedra.
11. Yuhanson K., Person P., 1973. Detonatsiya vzryvchatykh veshchestv [Detonation of explosives]. Moscow: Mir.
12. Kantor V.Kh., 2007. Printsipy proektirovaniya parametrov vzryvaniya skvazhinnykh zaryadov s uchetom trebovaniy po intensivnosti drobleniya gornoj massy [Principles of designing parameters for blasting borehole charges, taking into account the requirements for the crushing intensity of rock mass]. *Vzryvnoe delo*, № 97/54.
13. Persson P., Holmberg R., Lee J., 1994. *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press, Inc.
14. Kukib B.N., Ioffe V.B., Zhuchenko E.I., Frolov A.B., 2007. O kriteriyakh otsenki otnositel'noi rabotosposobnosti promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv [On assessing criteria for the relative operability of industrial explosives]. *Vzryvnoe delo*, № 8.