

УДК 622.235.535 + 622.861

## ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ ОТ ДЛИНЫ И МАТЕРИАЛА ЗАБОЙКИ

В.А.БОРОВИКОВ, И.Ф.ВАНЯГИН,  
В.А.АРТЕМОВ, В.К.ХУРИИДЗЕ

Крупные массовые взрывы и интенсификация отбойки горных пород на действующих карьерах, расположенных вблизи зданий и инженерных сооружений, обуславливают необходимость прогнозирования действия ударных воздушных волн (УВВ), так как они могут представлять определенную опасность. Поэтому чрезвычайно важно в этих случаях оценивать предельную массу заряда, применение которого не приведет к возникновению УВВ опасной интенсивности. Имея прогнозные расчеты, можно разрабатывать рекомендации по снижению параметров УВВ и мероприятия по предотвращению их вредного действия. Решение этой проблемы при отбойке горных пород обусловлено трудностью определения интенсивности эквивалентного источника УВВ. Степень уменьшения интенсивности УВВ при известной энергии взрыва существенно зависит от глубины заложения заряда (ЛНС), свойств породы, числа и очередности взрываемых зарядов и других факторов.

При уступной отбойке методом скважинных зарядов интенсивность УВВ определяется характером условий ее формирования в зависимости от истечения продуктов взрыва из зарядной камеры, которое может происходить как через устье скважины, так и в направлении ЛНС через трещины разрушенной взрывом породы.

Прорыв газов через трещины, выходящие на свободную поверхность уступа, приобретает определенную значимость для сильно трещиноватых пород, особенно в случае применения диагональных схем взрывания при больших коэффициентах сближения ( $m \geq 5$ ), когда фактические значения расстояний между рядами одновременно взрываемых скважин  $b$  находятся в пределах радиуса зоны трещинообразования. При нормальных ЛНС интенсивность УВВ при отбойке гранитов скважинными зарядами определяется прорывом продуктов взрыва через устье скважин и соответственно зависит от длины и материала забойки.

Исследованию влияния длины и материала забойки на интенсивность УВВ посвящен ряд работ в основном экспериментального характера [1-4, 6, 7, 9], в которых рассматривается сплошная конструкция заряда с забойкой из песка или буровой мелочи, а также мелкого щебня в смеси с песком. В работах [1, 4, 8] вводятся следующие важные понятия: коэффициент эквивалентности скважинного заряда  $k_{\text{экр}}$ , который зависит от общей массы заряда и соотношения длины забойки заряда [1]; коэффициент пропорциональности эквивалентной массы скважинного заряда, зависящий от относительной длины заряда; коэффициент влияния длины забойки скважинного заряда на величину избыточного

давления в УВВ  $k_3$  [4]. Коэффициенты характеризуют в основном интенсивность УВВ, генерируемых взрывом как одиночных, так и групповых мгновенно взрывающихся зарядов. Однако они не исчерпывают всех сторон формирования и распространения УВВ при массовых взрывах с применением многорядного КЗВ и различных схем коммутации сети, в частности, в них совершенно не затронут вопрос влияния ЛНС, геометрии расположения зарядов и параметров КЗВ.

В ранее выполненных исследованиях [2, 3] был предложен коэффициент перехода энергии массового взрыва в ударную воздушную волну  $k_{\Pi}$ , полученный сравнением интегральных характеристик амплитуд и импульсов УВВ, генерируемых накладным открытым зарядом и массовым взрывом, производимых в одних и тех же метеорологических условиях с интервалом в 2-3 с. Импульсы УВВ от этих взрывов регистрируются последовательно одной и той же аппаратурой, в одном и том же пункте наблюдений, что позволяет сохранить одинаковость условий распространения обеих волн и по рельефу местности. В этом случае коэффициент перехода энергии взрыва в УВВ определяется из известной зависимости для импульса УВВ [7]

$$J_+ = C_1 \frac{C^{2/3}}{r} \quad (1)$$

и выражений для энергии в УВВ, генерируемых накладным и скважинным зарядами,

$$\begin{aligned} E_{\Pi} &= G_{\Pi} Q_{\text{ВВ}}; \\ E_{\text{СКВ}} &= k_{\Pi} G_{\text{СКВ}} Q_{\text{ВВ}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $C_1$  - некоторая постоянная, для слабой УВ от взрыва тротила  $C_1 = 32 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  $G_{\Pi}$  и  $G_{\text{СКВ}}$  - масса накладного и скважинного заряда соответственно;  $Q_{\text{ВВ}}$  - теплота взрывчатого превращения ВВ.

При использовании одного и того же ВВ в скважинных и накладном зарядах из формул (1) и (2) легко получить выражение для коэффициента перехода энергии взрыва в УВВ:

$$k_{\Pi} = \left( \frac{J_{\text{СКВ}}}{J_{\Pi}} \right)^{3/2} \frac{G_{\Pi}}{G_{\text{СКВ}}} = \left( \frac{J_{\Sigma}}{J_{\Pi}} \right)^{3/2} \frac{G_{\Pi}}{G_{\Sigma}} \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

Первое выражение в формуле (3) - для одиночной скважины, второе - для массового взрыва;  $G_{\Sigma} = N G_{\text{СКВ}}$  - общая масса массового взрыва;  $N$  - число скважин (при этом предполагаются массы зарядов в скважинах одинаковыми). В работе [2] использовалось второе выражение формулы (3) для оценки коэффициента  $k_{\Pi}$  при массовых взрывах на гранитных карьерах.

На основании многочисленных измерений УВВ от накладного заряда и массовых взрывов в работах [2, 3] было определено значение  $k_{\Pi}$  для двух конкретных длин забойки из буровой мелочи:  $k_{\Pi} = 0,01$  при  $l_{\text{заб}} = 2$  м и  $d_3 = 160$  мм и  $k_{\Pi} = 0,005$  при  $l_{\text{заб}} = 4$  м и  $d_3 = 220$  мм. Для уточнения влияния длины забойки были использованы экспериментальные данные [1-4], а также данные специальных полигонных экспериментов, проведенных авторами.

Для исследования влияния величины забойки на коэффициент перехода энергии ВВ в УВВ при уступной отбойке гранита проводились модельные эксперименты в условиях карьера Вуоксинского щебзавода. На специально выделенном подуступе пробуривались шпур глубиной 1 м и диаметром 43 мм. Измерения проводились при взрывании каждого шпура в отдельности с различным сочетанием массы заряда и величины забойки.

Измерительные пьезоэлектрические преобразователи типа ДСЛ-15 (рис.1) устанавливались на металлической опоре на расстоянии 15 м от уступа. Регистрируемый сигнал подавался на усилитель мощности (рис.2,а) с полосой пропускания от 1 Гц до 100 кГц. Исследуемые параметры УВВ в виде электрического сигнала воспроизводились с помощью светолучевого осциллографа Н-117 на светочувствительной фотобумаге УФ-67. Рабочая частота гальва-

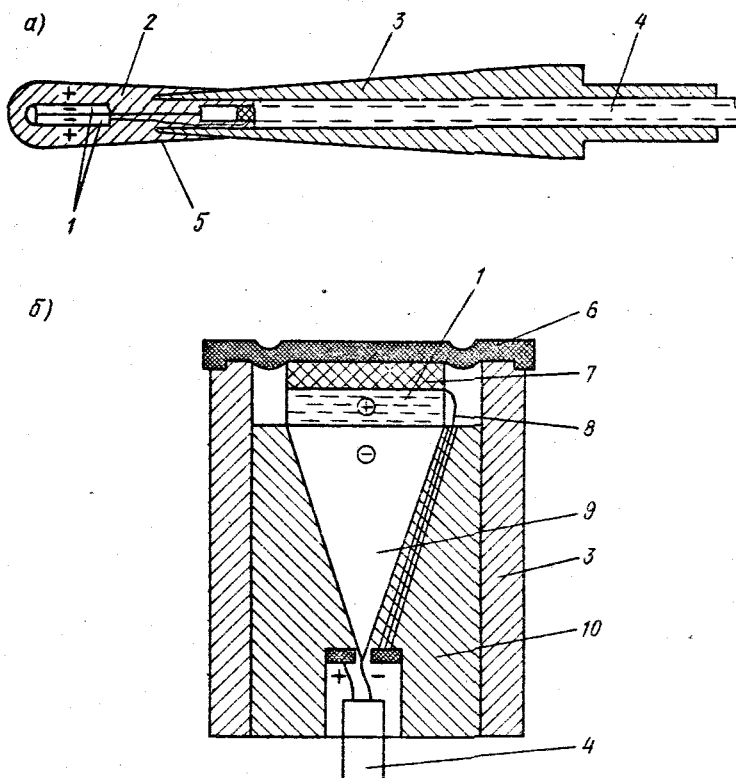


Рис.1. Общий вид пьезоэлектрических преобразователей  
ножевого (а) и мембранного (б) типов  
1 - пьезоэлемент; 2 - эпоксидная смола; 3 - корпус датчика; 4 - кабель АВК; 5 - металлический экран; 6 - мембрана; 7 - термоизоляционная прокладка; 8 - внешний электрод; 9 - центральный электрод; 10 - изолятор (фторопласт)

нометров выбиралась по длительности процессов, которая оценивалась по формуле М.А.Садовского:

$$\tau_+ = 1,5 \sqrt{G} \sqrt{r} 10^{-3}, \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние до места регистрации, м;  $\tau_+$  – длительность положительной фазы УВВ, с.

Рабочая частота составила в среднем  $10^{-2}$  с. Для четкой неискаженной записи процесса рабочая частота гальванометров  $f_p$  должна быть существенно больше, чем частота процесса  $f_0$ , определенная по длительности положительной фазы, т.е.  $f_p \gg f_0 = \frac{1}{\tau_+} = 100$  Гц. В эксперименте были использованы гальванометры с рабочей частотой от 400 до 1200 Гц.

Параметры ударных воздушных волн при дроблении негабарита методом накладных зарядов исследовались с использованием того же измерительного комплекса аппаратуры, что и в предыдущем эксперименте. Масса накладных зарядов достигала 2 кг. Измерения проводились для сосредоточенных зарядов в виде пачки патронированного аммонита № 3 ВБ и сегментных зарядов порошкообразного аммонита № 3 ВБ с засыпкой из буровой мелочи и без засыпки. Характерный вид записи эпюры избыточного давления во фронте УВВ представлен на рис.2,б.

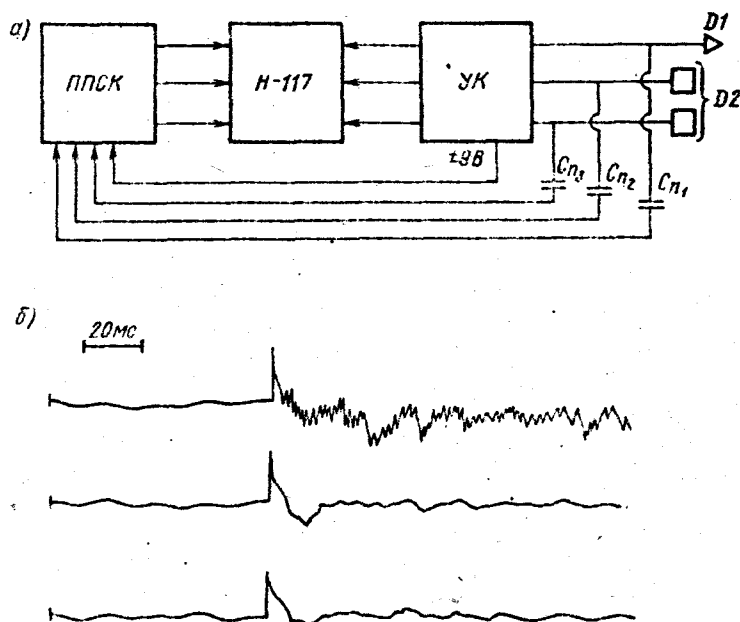


Рис.2. Блок-схема измерительного комплекса (а) и характерные осциллограммы УВВ (б). ППСК – прибор питания синхронизации и калибровки; УК – усилитель мощности;  $D_1$  – датчик-упреждающий;  $D_2$  – рабочие датчики;  $C_{II}$  – масштабная емкость.

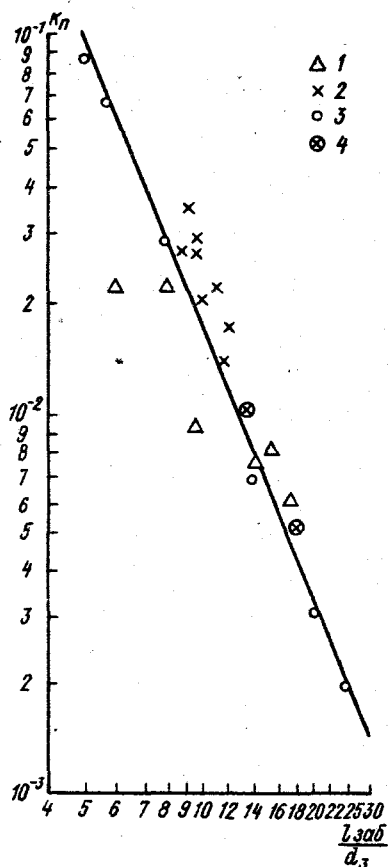


Рис.3. Обобщенный график влияния забойки на коэффициент перехода  $k_{\Pi}$  по данным [1] - 1; [4] - 2; [2, 3] - 3; по экспериментальным данным - 4

цию охраняемого объекта относительно взрывающегося блока.

С учетом зависимости (5) формула для оценки максимального давления в УВВ примет вид

$$\Delta p = 2,58 \cdot 10^5 k_M k_p f(N) \frac{\sqrt[3]{G \Sigma / \bar{l}_{заб}^{2,5}}}{r} \quad (7)$$

Импульс УВВ в соответствии с формулами (1) и (5) будет равен

$$J_+ = 33,3 \cdot 10^6 \frac{k_M k_p}{r} (G / \bar{l}_{заб})^{2/3} f(N). \quad (8)$$

Таким образом, в результате проведенных авторами экспериментальных исследований и данных работ [1, 2, 4] получена зависимость (5), учитывающая влияние длины сплошной забойки из песка или породной мелочи на интенсивность УВВ, и формулы (7) и (8) для определения избыточного давления и импульса УВВ, полностью характеризующие разрушающее действие УВВ.

На основании полученных экспериментальных данных и данных работ [1-4] на рис.3 построена экспериментальная зависимость  $k_{\Pi}$  в функции относительной длины забойки. Из рис.3 видно, что экспериментальные точки  $k_{\Pi}$  достаточно хорошо согласуются друг с другом в диапазоне относительных длин  $\bar{l}_{заб} = (8-22)d_з$  или  $\bar{l}_{заб} = (16-44)R_{03}$  и могут быть аппроксимированы степенной зависимостью вида

$$k_{\Pi} = \frac{33,6}{(\bar{l}_{заб})^{2,5}} = \frac{5,85}{(\bar{l}_{заб})^{2,5}}, \quad (5)$$

где  $\bar{l}_{заб} = l_{заб}/R_{03}$  - длина забойки, отнесенная к радиусу заряда (скважины);  $\bar{l}_{заб} = \frac{l_{заб}}{d_з}$  - длина забойки, отнесенная к диаметру заряда (скважины).

Интенсивность слабой УВВ при массовом взрыве скважинных зарядов равна [3]:

$$\Delta p = 0,8 \cdot 10^5 k_M k_p f(N) \frac{\sqrt[3]{k_{\Pi} G \Sigma}}{r}, \quad (6)$$

где  $k_M$  и  $k_p$  - коэффициенты, учитывающие методологические условия и особенности рельефа местности в районе между эпицентром взрыва и охраняемым объектом соответственно;  $f(N)$  - функция, учитывающая схему взрывания и ориента-

Для оценки влияния материала забойки на интенсивность УВВ можно воспользоваться экспериментальными данными работы [5], где исследовалось движение шести видов сплошной забойки: 1) щебень; 2) песок; 3) глина; 4) две ампулы с водой и пыжи из щебня между ними; 5) три ампулы с водой; 6) одна ампула с водой. Анализ этих данных позволяет определить скорость вылета забойки из устья скважины (шпура), а значит и скорость вылета продуктов взрыва из устья, формирующих УВВ:

| Вид сплошной забойки                                        | 1    | 2    | 3     | 4    | 5     | 6     |
|-------------------------------------------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|
| Время вылета забойки $t_{\text{в}}$ , м/с                   | 13,0 | 11,2 | 7,8   | 12,5 | 10,2  | 7,4   |
| Скорость вылета забойки $v_{\text{в}}$ , м/с                | 88,0 | 89,8 | 140,8 | 93,3 | 104,8 | 143,6 |
| $\Delta v_{\text{в}} = v_{\text{в}} - v_{\text{вп}}$ , м/с  | -1,8 | -    | 51,0  | 3,9  | 15,0  | 53,8  |
| $\delta v_{\text{в}} = \Delta v_{\text{в}} / v_{\text{вп}}$ | 0,02 | -    | 0,55  | 0,04 | 0,17  | 0,60  |

Скорость вылета забойки определялась как тангенс угла наклона касательной к экспериментальным кривым  $l = f(t)$  ( $l$  – смещение забойки во времени);  $v_{\text{вп}}$  – скорость вылета песчаной забойки. Анализ данных показывает, что применение забойки из щебня незначительно уменьшает интенсивность УВВ (примерно на 2 %), остальные типы забоек увеличивают интенсивность УВВ. Так, комбинированная забойка из двух ампул с водой и пыжа из щебня между ними незначительно увеличивает интенсивность УВВ (примерно на 4 %), а больше всего увеличивают интенсивность УВВ сплошная водяная забойка (на 60 %) и забойка из глины (на 55 %). Отсюда следует, что при использовании сплошной конструкции забойки наиболее целесообразна песчаная забойка, а также забойка из породной мелочи – наиболее простая и безопасная по разлету кусков из устья скважины.

#### Выводы

1. С увеличением длины забойки интенсивность УВВ непрерывно падает и в диапазоне изменения ее длины от 5 до 25 диаметров заряда коэффициент перехода энергии взрыва в УВВ аппроксимируется степенной зависимостью.
2. Уточнены экспериментальные формулы для определения избыточного давления и импульса УВВ, приведенные в работе [3], в соответствии с полученной зависимостью коэффициента перехода энергии взрыва в УВВ от величины забойки.
3. Забойка из мелкодисперсных материалов в виде буровой мелочи и отсева является эффективным средством снижения интенсивности УВВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богацкий В.Ф., Пономарев В.Г., Довгоша Ю.И. Метод определения предельно допустимого заряда по действию УВВ при массовых взрывах на карьерах. – В кн.: Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Севера. Л., изд. ЛГИ, 1972.

2. Боровиков В.А., Аюрзанайн Б.А. Безопасные зоны по действию ударной воздушной волны. Безопасность труда в промышленности, 1979, № 5.
3. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Определение предельной величины заряда массового взрыва по действию УВВ при отбойке гранита. - Изв. вузов, Горный журнал, 1983, № 5.
4. Ганопольский М.И., Цейтлин Я.И. К расчету давления на фронте ударной воздушной волны при массовых взрывах скважинных зарядов. - Горный журнал, 1980, № 1.
5. Исследование действия взрыва в горных породах / Э.О. Миндели, И.С. Кусов, А.А. Корнеев, Г.И. Марцикевич. М., Недра, 1978.
6. Кузнецов Г.В., Улыбин В.П. Параметры воздушных волн при взрывах в карьерах. - Изв. вузов, Горный журнал, 1973, № 5.
7. Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн. - В кн.: Физика взрыва. М., Изд-во АН СССР, 1980.
8. Степанов Ю.С., Демчук П.А. К определению оптимального заглубления удлиненных цилиндрических зарядов ВВ. - ФТПРПИ, 1975, № 5.
9. Цейтлин Я.И., Смолий И.И., Ганопольский М.И. Влияние забойки скважин на интенсивность воздушной ударной волны. - Горный журнал, 1973, № 2.