Г.М.КРЮКОВ
Московский горный университет, Россия

И.В.СМАГЕР, И.И.ДРОЗД
Военно-инженерный университет, Москва, Россия

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН МЕЛКОДИСПЕРСНОГО И РАДИАЛЬНОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПОРОД ВЗРЫВОМ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ

Процессам разрушения горных пород взрывом посвящено большое количество научных, научно-исследовательских, опытных и опытно-промышленных работ как в России (СССР), так и за рубежом. В результате этих работ были установлены основные закономерности процессов деформирования и разрушения пород взрывом. Тем не менее при решении конкретных практических задач в конкретных горно-технических условиях приходится проводить дополнительные научно-исследовательские и опытно-промышленные работы, позволяющие с заданной результативностью и надежностью вести буровзрывные работы. Это обусловлено, во-первых, сложностью строения и соответственно широкой вариабельностью свойств объектов,

деформируемых и разрушаемых взрывом; во-вторых, горно-техническими и технологическими особенностями ведения взрывных работ и, в-третьих, несовершенством разработанных моделей взрывного воздействия на деформируемую и разрушаемую среду.

Наиболее законченной моделью в настоящее время считается модель, разработанная в ИФЗ группой В.Н.Радионова, В.В.Адушкина, В.М.Цветкова и др. под руководством акад. М.А.Садовского [6]. Являясь развитием модели, предложенной Г.И.Покровским [5], эта модель описывает процессы деформирования и разрушения горных пород при крупномасштабных взрывах. Добросовестная адаптация этой модели к процессам разрушения горных пород взрывом удлиненных зарядов применительно к горному производству [4] не позволила получить положительных результатов. Причем результаты соответствующих расчетов расходились с опытными данными в 2-4 раза. И обусловлено это было существенным отличием этой модели от процессов разрушения горных пород взрывом скважинных и шпуровых зарядов в горном деле. Поэтому в МГГУ были проведены оценка этих условий и уточнения модели Г.И. Покровского применительно к этим процессам [3].

Главными отличиями уточненной модели являются учет: «кажущегося» повышения прочности пород при высокодинамичном нагружении, отставания фронта разрушения от переднего фронта взрывной волны и «истории» нагружения пород с самого начала действия взрывных волн. Развивая идеи [4], авторами на основе простого соотношения

$$M = qV; \tag{1}$$

для процессов разрушения горных пород взрывом шпуровых и скважинных зарядов доказана справедливость соотношений:

$$b_* = a\sqrt{P_o / \sigma_{раз}}\,; \qquad b_o = a\sqrt{P_o / \sigma_{рас}}\,, \tag{2}$$

где M – масса заряда, кг; q – удельный расход данного ВВ, кг/м^3; V – объем разрушаемой породы, м^3; b_* – радиус зоны мелкодисперсного дробления, м; b_o – радиус зоны радиального трещинообразования (регулируемого дробления), м; a – радиус полости скважины (шпура), м; P_o – давление продуктов детонации, соответствующее точке Жуге, Па; $\sigma_{раз}$ – предел прочности пород на раздавливание, Па; $\sigma_{рас}$ – предел прочности пород на одноосное растяжение, Па, $\sigma_{раз} = 13\left[1 + 0{,}079(f-15) + 0{,}0019(f-15)^2\right]10^8$; f – крепость пород по М.М.Протодьяконову.

Причем утверждается, что деформированное состояние вблизи заряда, определяющее разрушение пород, описывается соотношениями:

$$\sigma_{rr} = -P_o(a/r)^2; \qquad \sigma_{\alpha\alpha} = -\sigma_{rr}, \tag{3}$$

где σ_{rr} – радиальные сжимающие напряжения, Па; $\sigma_{\alpha\alpha}$ – азимутальные растягивающие напряжения, Па; r – расстояние от рассматриваемой точки до оси заряда, м.

Необходимо отметить, что соотношение (3) и ранее, без какого-либо обоснования, принималось и предлагалось разными исследователями [1,2 и др.], при этом всегда оставался открытым вопрос, как могут сформироваться такие соотношения, что понимается под величинами $\sigma_{раз}$ и $\sigma_{рас}$, хотя в [1] имелся достаточно интересный материал, подтверждающий (2) в экспериментальных исследованиях. Теоретические оценки, выполненные под руководством одного из авторов и полученные путем прямого интегрирования соответствующих уравнений в [2] для распределения напряжений в ближней зоне около заряда,показали, в частности, что характер этого распределения довольно быстро (порядка 100 мкс) приближается к (3) и практически не зависит от процесса трещинообразования непосредственно около скважины. Эти результаты и данные о зависимости механических свойств от скорости деформации и явились отправными пунктами для установления взаимосвязи (2) и (3).

Опираясь на соотношения (2) и (3) были проанализированы результаты лабораторных и натурных исследований, выполненных авторами по разрушению различных материалов взры-

вом шпуровых зарядов. В лабораторных условиях разрушались силикатные блоки и блоки из оргстекла. Взрывались шпуровые заряды от 3 до 6 мм и длиною 50-60 мм, в качестве ВВ использовались пиротехнические составы (ПС) с теплотой взрывчатого превращения от 1676 до 5028 Дж/г при насыпной плотности 0,95 г/см^3. Выполненные исследования показали, что объем интенсивного мелкодисперсного дробления, определяемого b_*, действительно пропорционален m – массе заряда, приходящейся на единицу длины, и Q – теплоте взрывчатого превращения ПС. При этом установлено, что воздействие волн напряжений от взрыва предыдущих зарядов может приводить, по крайней мере, к двухкратному повышению объема мелкодисперсного дробления многокомпонентных сред при взрыве данного заряда при расстояниях от этого заряда до взрываемых, в 3-4 раза превышающих радиус b_o.

Из (2) и (3) следует, что при одновременном взрыве двух удлиненных зарядов взаимное влияние полей напряжений на процесс разрушения будет иметь место при $L < 2{,}1b_o$ (где $2L$ – расстояние между зарядами). Этот факт полностью подтвердился в лабораторных исследованиях. Из (2) и (3) также следует, что если при одновременном взрыве двух зарядов $L < \sqrt{2}b_o$, то по плоскости расположения зарядов будет формироваться одна общая трещина, с существенным снижением длины трещин в другие стороны. Наконец, из (2) и (3) следует, что влияние дополнительной свободной поверхности на процесс разрушения пород будет происходить при $W < 2{,}1b_o$, при этом в сторону свободной поверхности будут развиваться магистральные трещины, причем с уменьшением W число этих трещин возрастает.

При наличии второй дополнительной свободной поверхности при $W_1 \cong W_2$ число магистральных трещин в сторону обоих дополнительных свободных поверхностей возрастает в 1,5-1,8 раза.

При $L < 2{,}1b_o$ за счет взаимного влияния полей напряжений от двух одновременно взрываемых зарядов имеется возможность снизить нарушенность в законтурной части массива по условию $\tau_1 \le 1{,}2\tau_2$ (где τ_1 – время прорастание трещин, с, $\tau_1 = b_o / 0{,}4C_p$; τ_2 – время прихода взрывной волны от соседнего заряда к данному, с, $\tau_2 = \sqrt{4L^2 + b^2{}_o}\,/(C_p + V_{м.ч})$; $C_Р$ – скорость распространения продольных волн, м/с; $0{,}4C_p$ – скорость развития трещины, м/с).

На основании этих результатов было высказано предположение о том, что применение КЗВ между зарядами в ряду и между самими рядами, обеспечивающее независимое взрывное разрушение среды каждым зарядом, должно повысить эффективность этого процесса. Сопоставительные взрывы 18 и 22 зарядов в силикатных блоках и оргстекле при одновременном и КЗВ подтвердили это предположение и позволили получить повышение степени дробления с уменьшением $d_{ср} \approx 10$ %.

Натурные экспериментальные исследования проводились на полигоне учебного центра Тюменского филиала ВИУ путем взрыва в мерзлом грунте шпуровых зарядов с серийным ВВ – тротиловые шашки длиною 70 мм, диаметром 30 мм и массой 75 г. В этих исследованиях практически полностью подтвердились закономерности, полученные в лабораторных условиях: последовательное взрывание рядов зарядов с КЗВ позволяет повысить эффективность дробления грунтов приблизительно в 2 раза по сравнению с одновременным взрывом комплекта таких же зарядов.

На основании установленных закономерностей были разработаны и переданы к применению рациональные параметры БВР для взрывного рыхления мерзлых грунтов при устройстве ФС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андриевский А.П.* Разработка рациональных параметров взрывания при проходке подземных выработок на основе установленных закономерностей образования зон разрушения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / МГИ. М., 1998.

2. *Глазков Ю.В.* Разработка способа контурного взрывания с предварительным напряжением массива при строительстве выемок: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. М.: ИНПИС, 1988.

3. *Крюков Г.М.* Закономерности формирования зон мелкодисперсного дробления и радиального трещинообразования при камуфлетном взрыве сосредоточенного заряда в квазиоднородной среде / Г.М.Крюков, А.П.Косаргин // Сборник «Взрывное дело» № 91/48. М.: МВК по взрывному делу при Академии горных наук,1998.

4. *Крюков Г.М.* Физика взрывного разрушения / МГИ. М., 1986.

5. *Покровский Г.И.* Действие удара и взрыва в деформируемых средах / Г.И.Покровский, И.С.Федоров. М.: Госстройиздат, 1957.

6. *Радионов В.Н.* Основы геомеханики / В.Н.Радионов, И.А.Сизов, В.М.Цветков. М.: Недра, 1986.