

УДК 622.02

**А.В. Дугарцыренов, В.А. Белин, Г.М. Крюков,
П.А. Вавер**

ОПТИМИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАНИИ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрены квадратная и прямоугольная сетки скважин при условии соприкосновения зон регулируемого дробления. В местах вероятного образования негабаритов в центрах элементарной ячейки сетки скважин предложено бурить дополнительные скважины. Получены соотношения, позволяющие осуществить выбор взрывчатого вещества для дополнительных скважин.

Ключевые слова: горная порода, взрыв, зона регулируемого дробления, негабарит.

**A.V. Dugartsirenov, V.A. Belin,
G.M. Krukov, P.A Vaver**

OPTIMIZING THE QUALITY OF BREAK-UP WHEN EXPLODING ROCK MASSIVES

The article explores the square and orthogonal well patterns under the contact of regulated fracture zones. A suggestion is made that one should drill additional clefts in places of probable formation of boulders at the centers of elementary cells of well patterns. The article gives correlations enabling to choose an explosive for additional clefts.

Key words: rocks, explosion, regulated fracture zone, boulder.

По современным представлениям при взрывании скважинных зарядов оптимальное качество дробления горных пород обеспечивается в так называемой зоне регулируемого дробления, радиус которой определяется пределом прочности породы на растяжение [1]. Это связано с тем, что разрушение породы обусловлено полярными растягивающими напряжениями, возникающими при действии давления газообразных продуктов взрыва на стенки скважины и величина которых суще-

ственно превышает предел прочности породы на растяжение $\sigma_{рас}$.

Качество дробления горных пород при их взрывной отбойке от массива определяется сеткой скважин, которая связана с расстояниями между скважинами в ряду и между их рядами. На практике обычно применяют прямоугольную или квадратную сетку скважин. При этом размеры этой сетки находят исходя из условия соприкосновения зон регулируемого дробления [1].

Наиболее вероятной зоной, в которой возможно образование негабаритов, является центральная часть элементарной ячейки сетки скважин. Для предотвращения образования негабаритов и повышения качества дробления предложены способы, предусматривающие дополнительные скважины в центре элементарной ячейки [2, 3]. Однако осуществить выбор взрывчатого вещества для дополнительных скважин, диаметр которых в общем случае может отличаться от диаметра основных скважин, исходя из условия соприкосновения зон регулируемого

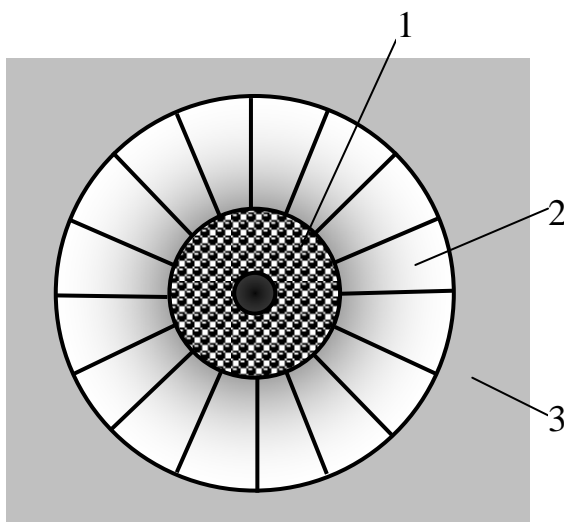


Рис. 1. Схема зон дробления при взрыве цилиндрического заряда

дробления по существующим методикам [1] приводит к значительным погрешностям, связанным с расширением скважин и падением давления газов в ней [4].

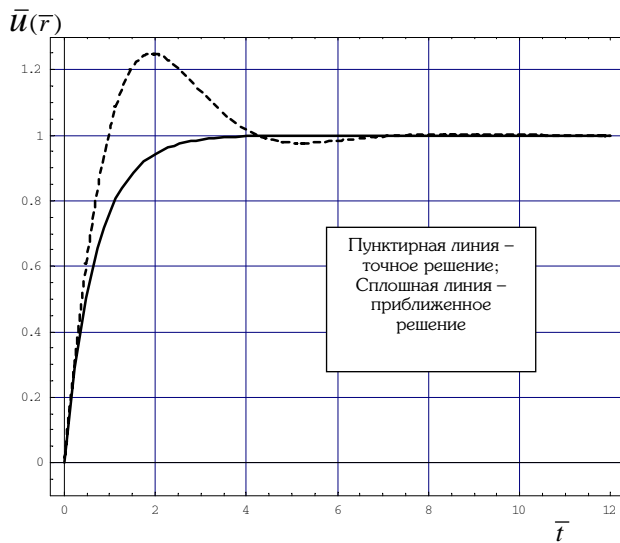
Существующие методики основаны на приближенном решении квазистатической задачи о взрыве в цилиндрической бесконечной полости в упругой среде. По современным представлениям [5, 6, 7] область разрушения сплошной среды (горной породы) при взрыве условно может быть разделена на три зоны (рис. 1): дробления 1, радиальных трещин 2 и упругую 3. При взрыве скважинного заряда вблизи стенок скважины вследствие действия высоких давлений создается зона дробления, включающая мелкодисперсную часть и область, где клиновидные сектора разрушаются сдвиговыми напряжениями. Далее находится зона радиальных трещин, обусловленная действием растягивающих полярных напряжений. Граница последней, определяется из условия равенства полярных напряжений

пределу прочности породы на растяжение. За пределами зоны трещин находится упругая зона.

Следует отметить, что точное аналитическое решение задачи о взрыве цилиндрического заряда в упругой среде отсутствует. Подобная задача, но при воздействиях специального вида на цилиндрическую полость в среде решена Селбергом Г. [8], однако она не применима к взрыву удлиненного заряда. В то

же время для статического случая, являющегося предельным к динамическому воздействию, имеется решение, полученное Ламе [9]. Сложность решения такой задачи обусловлена тем, что напряжения в среде при динамическом рассмотрении носят колебательный быстрозатухающий характер, определяемый в изображении функциями Бесселя и Макдональда, обратное интегральное преобразование которых связано с контурным интегрированием, которое выполняется только в простейших случаях.

Такое положение вызвало большое число приближенных решений. Большинство из них связано с решением приближенных уравнений теории упругости и их адекватность реальному напряженному состоянию среды, формируемому в произвольный момент времени при взрыве удлиненного заряда требует обоснования. В последнее время получено относительно простое приближенное решение [1], существо которой сводится к замене периодической функции, определяющей



колебательное движение среды, на монотонную функцию, сходящуюся на бесконечности к той же величине, что и периодическая. При этом монотонная функция является решением дифференциального уравнения о генерации упругих волн сферическим и цилиндрическим излучателем. Близость данного решения к точному с позиции сходимости подтверждена при сравнении с точным решением Дж. Шарпа о нагружении сферической полости в упругой среде постоянным давлением [10]. Максимальное расхождение приближенного и точного решений для зависимости относительного перемещения границы полости $\bar{u} = u/u_0$ от безразмерного времени $\bar{t} = C_1 t/r_0$ не превышает 25 % (рис. 2). Здесь r_0 и u_0 - соответственно радиус и перемещение границы сферической полости, E и ν - модуль упругости и коэффициент Пуассона и C_1 - скорость продольной волны в среде. Стабилизация величин перемещений наступает примерно при $\bar{t} = 4$ или в размерных единицах

Рис. 2. Сравнение точного и приближенного решений задачи Ламе

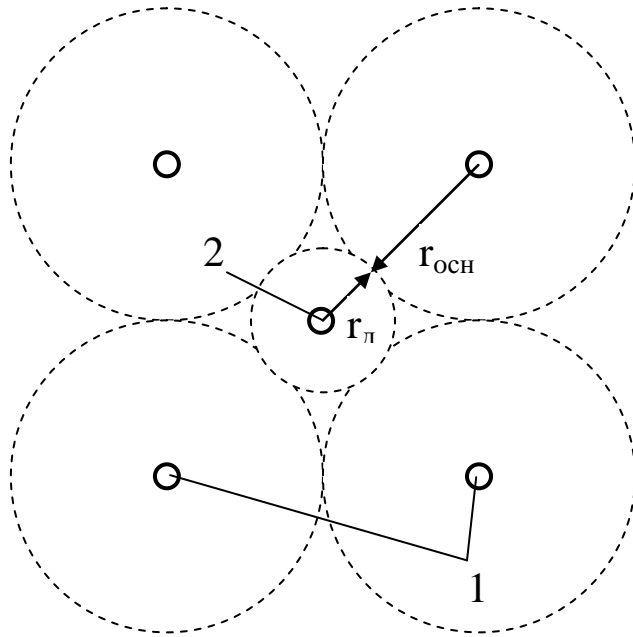
($\bar{t} = 1 \Leftrightarrow t = 94,64$ мкс) при $t = 378$ мкс, т.е. практически мгновенно.

Также показано [1], что в приближенном решении величины деформаций и напряжений стремятся при $\bar{t} \rightarrow \infty$ к статическим значениям, совпадающим с решением Ламе.

Следовательно, при оценке напряженного состояния твердой упругой среды со сферической или цилиндрической полостями, нагруженными по их границе давлением, можно использовать статическое решение Ламе, полученное для случая постоянного давления p_0 [9]. Например, это решение используется для оценки напряжений в среде при взрыве в ней сосредоточенного и цилиндрического зарядов [1].

Однако при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) давление продуктов детонации уменьшается вследствие расширения полости за счет перемещения ее границы и в состоянии равновесия достигает некоторого значения $p_0^* < p_0$. Поэтому действительные значения перемещения, напряжений и деформаций будут меньше величин, полученных по формулам Ламе [11]. Учет снижения давления в зарядной полости в линейном приближении проведен в работе [12].

Согласно этой работе величина полярных растягивающих напряжений σ_φ в массиве в зависимости от



положения точки после расширения стенок скважины может быть определена по соотношению:

$$\bar{\sigma}_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{p_0} = \frac{E}{E + 2k p_0 (1 + \nu)} \cdot \frac{1}{\bar{r}^2}. \quad (1)$$

где $\bar{r} = r/r_0$ - относительная координата точки ($r \geq r_0 \Leftrightarrow \bar{r} \geq 1$); r_0 - радиус скважины; E - модуль упругости горной породы; ν - коэффициент Пуассона; k - показатель политропы взрывных газов.

Исходя из условия соприкосновения зон регулируемого дробления элементарная ячейка сетки скважин может быть представлена в виде (рис. 3). Радиус зоны регулируемого дробления r с учетом расширения стенок скважины определяется выражением [12]:

$$r = r_0 \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\xi \cdot \sigma_{рас}}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \xi = 1 + 2 \frac{k p_0 (1 + \nu)}{E}.$$

Рис. 3. Элементарная ячейка сетки скважин: 1 - основные скважины; 2 - дополнительная скважина

Тогда расстояние между основными скважинами $a = 2r_{осн}$ находится по формуле

$$a = 2r_{осн} \cdot \sqrt{\frac{P_{осн}}{\xi_{осн} \cdot \sigma_{рас}}}. \quad (3)$$

Начальное давление $p_{осн}$ продуктов детонации конденсированных ВВ для основных скважин определяется по формуле [13]:

$$p_{осн} = \frac{\rho_{осн} D_{осн}^2}{\gamma_{осн} + 1}, \quad (4)$$

где $\rho_{осн}$ - плотность заряжения ВВ; $D_{осн}$ - скорость детонации; $\gamma_{осн}$ - показатель изэнтропии продуктов детонации для ВВ в основных скважинах.

Радиус регулируемого дробления для дополнительных скважин определяется соотношением

$$r_d = r_{осн} \cdot \sqrt{\frac{P_{осн}}{\xi_{осн} \cdot \sigma_{рас}}} (\sqrt{2} - 1). \quad (5)$$

С другой стороны согласно (2) для дополнительных скважин имеем

$$r_d = r_d \cdot \sqrt{\frac{P_d}{\xi_d \cdot \sigma_{рас}}}. \quad (6)$$

Начальное давление продуктов детонации ВВ для дополнительных скважин определяется по формуле

$$p_d = \frac{\rho_d D_d^2}{\gamma_d + 1}.$$

Объединяя (5) и (6) находим

$$r_d \cdot \sqrt{\frac{P_d}{\xi_d \cdot \sigma_{рас}}} = r_{осн} \cdot \sqrt{\frac{P_{осн}}{\xi_{осн} \cdot \sigma_{рас}}} (\sqrt{2} - 1). \quad (7)$$

При заданных параметрах ВВ для основных скважин и радиусе дополнительной скважины равенство (7) позволяет определить параметры ВВ

для дополнительных скважин, обеспечивающее полное разрушение центральной части элементарной ячейки сетки скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крюков Г.М., Глазков Ю.В.* Феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом промышленных ВВ. Отдельные статьи ГИАБ. – 2003. - №11. – 67 с. – М.: Изд-во МГТУ.
2. *Шубин Г.В. и др.* Оптимизация параметров БВР при отбойке руды на карьере «Удачный». Взрывное дело: Сборник научных трудов. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007 - №ОВ7. – с. 97-104.
3. *Белин В.А., Дугарцыренов А.В., Цэдэнбат А.* Взрывание неоднородных массивов горных пород с вечномерзлыми линзообразными включениями. Взрывное дело: Сборник научных трудов. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – 2007 - №ОВ7. – С. 266-272.
4. *Крюков Г.М., Дугарцыренова Э.А., Дугарцыренов А.В.* Напряженное равновесное состояние среды с полостью с учетом ее расширения в линейном приближении. Обозрение прикладной и промышленной математики.-2005.-Т. 14, вып. 1.-с. 1003-1004.
5. *Кузнецов В.М.* Математические модели взрывного дела. - Новосибирск: Наука, 1977. – 263 с.
6. *Механический эффект* подземного взрыва / Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др.: Под общей ред. М.А.Садовского. – М.: Наука, 1971. – 224 с.
7. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. *Selberg H.L.* Transient Compression Wave from Spherical and Cilindrical Cavities, Arkiv f. Fisik, **5**, 7, (1952), 97-108.
9. *G. Lamé.* Lecons sur La Theorie ... de l'Elasticite, Paris. 1852.
10. *Sharp J.A.* The program of Elastic Waves by Explosive Pressure, Geophysics, **7** (1942), 144-154, 311-321.
11. *Крюков Г.М., Дугарцыренова Э.А., Дугарцыренов А.В.* Напряженное равновесное состояние среды с полостью с учетом ее расширения в линейном приближении. Обозрение прикладной и промышленной математики.-2005.-Т. 14, вып. 1.-с. 1003-1004.
12. *Дугарцыренов А.В., Белин В.А., Крюков Г.М., Вавер П.А.* Обобщение задачи Ламе и его приложение к вопросам взрывного разрушения горных пород. ГИАБ №11, 2009. – С. 19-25.
13. *Орленко Л.П.* Физика взрыва и удара. – М.: Физматлит, 2006. – 304 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Дугарцыренов А.В. – доцент кафедры "Взрывное дело", fizika@rbcm.ru,
Белин В.А. – профессор, доктор технических наук, кафедра "Взрывное дело",
Крюков Г.М. – профессор, доктор технических наук, кафедра "Взрывное дело",
Вавер П.А. - аспирантка кафедры "Взрывное дело",
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

