



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ РАДИАЛЬНЫХ ТРЕЩИН
В СЛОИСТОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ
ПРИ ВЗРЫВЕ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ И ГИДРОРАЗРЫВЕ**

Е. Н. Шер

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ensher@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Исследованы особенности и разработана расчетная схема развития радиальных трещин в слоистом породном массиве при взрыве скважинных зарядов и гидроразрыве. Для расчета напряженного состояния упругого породного массива с трещинами использован метод граничных элементов в трехмерной постановке. Определено влияние прочностных свойств слоев массива на форму радиальных трещин и их площадь.

Взрыв, горные породы, слоистый породный массив, скважинный заряд, радиальные трещины, гидроразрыв, форма трещин

**DETERMINATION OF SHAPES AND SIZES OF RADIAL CRACKS
FORMED BY BLASTHOLE CHARGES AND HYDRAULIC FRACTURING
IN A LAYERED ROCK MASS**

E. N. Sher

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: ensher@gmail.com, Krasny prospect 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The features are investigated and a design diagram is developed for radial cracks propagation in a layered rock mass during blasting of borehole charges and hydraulic fracturing. To calculate the stress state of an elastic rock mass with cracks, we used the boundary element method in a three-dimensional formulation. As a result of these calculations, the influence of the strength properties of rock mass layers on the shape of radial cracks and their area was determined

Blast, rocks, layered rock mass, blasthole charge, radial cracks, hydraulic fracturing, crack shape

Работы по добыче полезных ископаемых в горной промышленности проводятся в основном с применением массовых взрывов. Во взрываемом блоке породного массива предварительно проводится бурение большого числа скважин согласно проектной сетке. Параметры буровзрывных работ, такие как расстояния между скважинами в ряду и между рядами, распределение заряда вдоль скважины, определяются размерами зон разрушения скважинных зарядов. Оценки размеров зон разрушения одиночных скважинных зарядов в однородном породном массиве приведены в ряде работ [1–3]. Для более точной теоретической оценки параметров буровзрывных работ важно учитывать структуру взрываемого массива. В нем могут быть более прочные или слабые пропластки. Аналогичная ситуация возникает при проведении гидроразрыва в слоистой горной породе.

При взрыве удлиненных шпуровых и скважинных зарядов в хрупкой монолитной горной породе основной объем разрушений приходится на зону радиальных трещин. Для оценки их размеров и формы, возникающих при взрыве удлиненного заряда заданной длины, разработана программа расчета развития системы равномерно распределенных по углу плоских радиальных трещин [4]. Согласно зонной модели взрыва [5–7], после детонации заряда вглубь породы от скважины распространяется упругая волна сжатия и за ней фронт волны дробления. По мере ее распространения напряжения в упругой волне уменьшаются и фронт волны дробления затормаживается. При снижении скорости ее развития до максимальной скорости распространения трещин и при появлении растягивающих азимутальных напряжений возможно образование и развитие радиальных трещин [3]. При этом фронт волны дробления останавливается и фиксируется радиальное смещение упругой среды на границе с раздробленной породой. Достигнутое на первом этапе взрыва расширение упругой среды в последующем сохраняется из-за сопротивления радиальному сжатию раздробленной породы, деформирующейся по закону сухого трения. Такое расширение приводит к развитию в упругой зоне породного массива системы радиальных трещин. Так как окончательные размеры радиальных трещин при взрыве оказываются много больше радиуса зоны дробления, при моделировании предполагается, что их развитие в упругой плоскости начинается с развития радиальной системы N трещин прямоугольной формы, расположенных вдоль оси удлиненного заряда и имеющих размеры, равные длине заряда и радиальному размеру зоны дробления r_d . Предполагается также, что берега начальных полосок этих трещин нагружены постоянным давлением p_d , обеспечивающим раскрытие трещин d_0 , соответствующее смещению границы упругой зоны и зоны дробления, достигнутой на первом этапе взрывного разрушения. Для нахождения формы радиальных трещин в заключительной стадии их развития, которое происходит в динамическом режиме, рассматривается квазистатический процесс развития трещин при последовательном увеличении раскрытия d_0 . На каждом шаге расчета определяется напряженное состояние упругой среды вблизи фронта трещин с целью выявления возможного разрушения среды и развития трещины.

Для расчетов трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с радиальной системой равномерно распределенных по углу плоских трещин, нагруженных внутренним давлением, использовался метод разрывных смещений [8, 9]. Согласно этому методу, поверхность трещин разбивается на квадратные элементы с шагом a , в пределах которых раскрытие и сдвиги берегов трещины считаются постоянными. Таким образом, трещины представляются набором дислокационных элементов, описываемых векторами Бюргерса, компоненты которых заранее могут быть неизвестны. Они определяются из требования выполнения граничных условий в напряжениях в центрах дислокационных элементов в результате решения соответствующей системы линейных уравнений, коэффициенты которой являются коэффициентами взаимного влияния элементов друг на друга. Для вычисления коэффициентов влияния применялись формулы Пича–Келлера, представляющие компоненты тензора напряжений в произвольной точке упругого пространства рядом с дислокационным разрывом через контурные интегралы вдоль его границы. Эти же формулы использовались для расчета напряжений вблизи кромок трещин для определения их развития.

Для расчетов развития трещин при взрыве и гидроразрыве в массиве, содержащем слои с пониженной и повышенной прочностью, разработанные ранее программы [8, 9] были модифицированы. В них введен учет изменения прочности среды в зависимости от координаты точки, где проверяется возможность разрушения. Для случая слоистой среды по значению z (ось z перпендикулярна слоям) устанавливается принадлежность точки тому или иному слою. Реализованы варианты двухслойной среды и среды с пропластком. В первом случае вводится коор-

дината границы слоев z_0 . При $z < z_0$ принимается прочность среды на растяжение σ_t , при $z > z_0$ прочность другой среды $\sigma_t * \beta$. Параметры z_0 и β задаются в программе. Пример расчетов форм трещин, образующихся при взрыве удлиненного заряда по этому варианту представлен в безразмерном виде на рис. 1. Расчеты выполнены для случая развития двух диаметрально противоположных трещин и разного значения раскрытия d_0 на начальных полосках, определяемого радиусом заряда ВВ. В расчетах также принималось, что газообразные продукты детонации не проникают в трещины и вновь образующиеся берега трещин свободны от нагрузок. Видно, что в более прочном верхнем слое при $z > z_0$ развитие трещины происходит в меньшей степени, чем в нижнем слое.

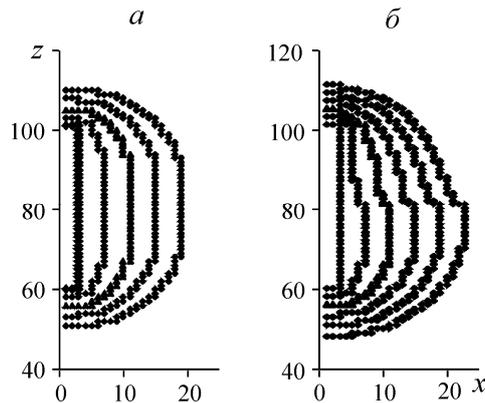


Рис. 1. Формы радиальных трещин, образующихся при взрыве: *a* — в однородном массиве ($\beta = 1$); *б* — в массиве с повышенной прочностью верхней его части ($\beta = 1.5$)

Результаты расчетов форм трещин, образующихся при взрыве удлиненного заряда в случае наличия пропластка в основном слое, приведены на рис. 2. Принималось, что по высоте центр заряда расположен в середине пропластка, поэтому показаны формы трещин только в первом квадранте плоскости (x, z). Видно, что для равномерного развития трещин вдоль скважины необходимо корректировать распределение ВВ вдоль нее, уменьшая или увеличивая погонное распределение ВВ в прослойке.

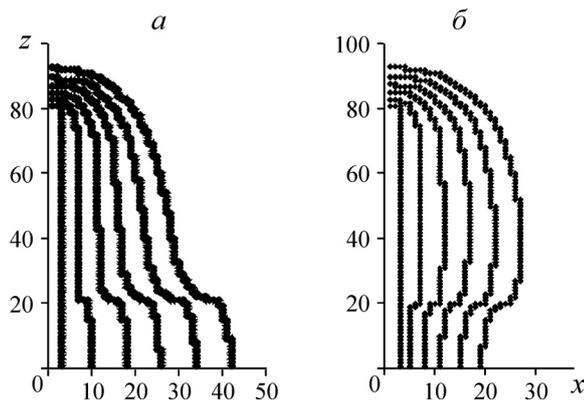


Рис. 2. Формы развития радиальных трещин, образующихся при взрыве удлиненного заряда в массиве, содержащем прослойки: *a* — с пониженной прочностью ($\beta = 0.5$) и *б* — с повышенной ($\beta = 1.8$) при $z < 20$

Вопрос моделирования развития трещин при гидроразрыве достаточно хорошо разработан. Кроме классических одномерных моделей [10, 11] существуют развитые двумерные и трехмерные модели. Последние отличаются большой сложностью их реализации, поэтому в инженерной практике используются приближенные псевдотрехмерные модели [12, 13].

Разработанная программа позволяет также рассчитывать формы трещин гидроразрыва в слоистом пласте в случае, когда разрыв производится маловязкой жидкостью. В этом случае можно считать, что берега трещин нагружены постоянным по их поверхности давлением.

Проведены расчеты развития в плоскости x, z первоначально дисковой трещины в слое $|z| < 10$, граничащем с более прочными породами. На практике начальная дисковая трещина создается разрывом пласта вокруг скважины, пробуренной горизонтально в направлении минимального сжатия. Результаты расчетов в безразмерном виде приведены на рис. 3. В расчетах учитывалась симметрия относительно оси $z = 0$. Видно, что с увеличением прочности внешних слоев массива дисковая трещина гидроразрыва распространяется в основном по слою с меньшей прочностью, переходя в вариант развития трещины Перкинса, Керна, Нордгрена.

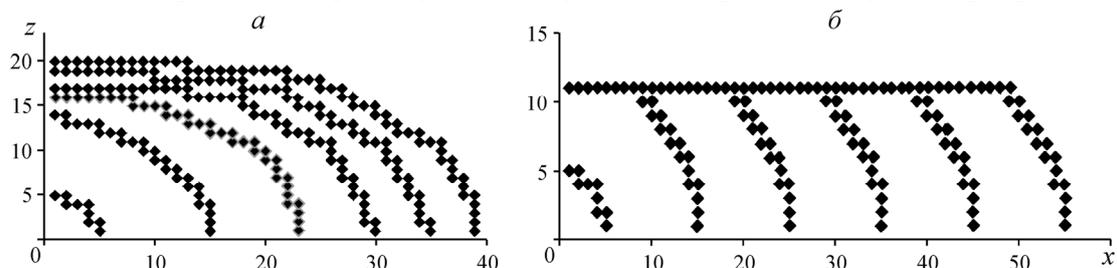


Рис. 3. Формы развития дисковой трещины гидроразрыва в слое, граничащем с более прочными породами при упрочнении: a — $\beta = 1.5$; b — $\beta = 2.5$

Результаты расчетов влияния прослойки на развитие трещины гидроразрыва показаны на рис. 4. Из сравнения форм трещин видно, что наличие ослабленного слоя приводит к преимущественному развитию в нем трещины гидроразрыва. Это снижает равновесное давление и уменьшает развитие трещины в окружающем, более прочном массиве. Наличие более прочного слоя приводит к противоположному результату.

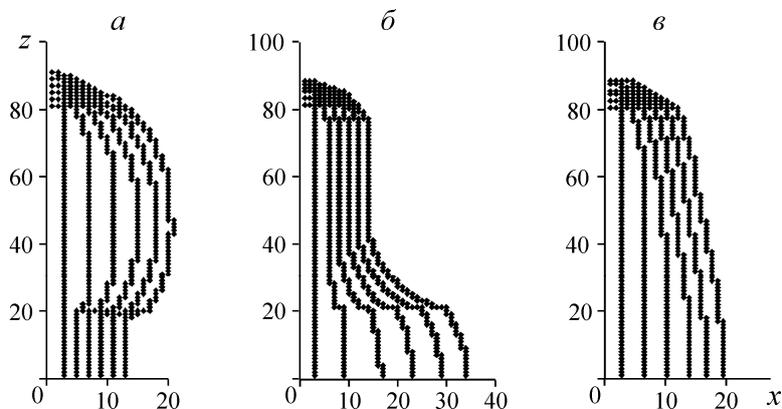


Рис. 4. Развитие трещины гидроразрыва: a — в массиве со слоем повышенной ($\beta = 1.8$) и b — пониженной ($\beta = 0.5$) прочности при $|z| < 20$; c — без прослойки

ВЫВОДЫ

Разработана расчетная схема определения формы и размеров радиальных трещин, образующихся при взрыве скважинных зарядов в слоистом породном массиве. Расчеты показали, что для равномерного разрушения породы вдоль скважины необходимо корректировать погонное распределение заряда ВВ с учетом прочности пород слоистого массива.

Предложена расчетная схема определения формы и размеров трещины гидроразрыва, образующейся в слоистом породном массиве. Установлено, что понижение прочности в слое приводит к увеличению размера развивающейся в нем трещины. При этом снижается равновесное давление, что вызывает уменьшение поперечных размеров трещины в окружающем, более прочном массиве. Наличие более прочного слоя увеличивает размеры трещины в окружающем массиве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Mosinets V. N.** Crushing and seismic action of an explosion in rocks, Moscow, Nedra, 1976. (in Russian) [**Мосинец В. Н.** Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 272 с.]
2. **Kutuzov B. N. and Andrievskiy A. P.** A new theory and new technologies for the destruction of rocks by elongated explosive charges, Novosibirsk, Nauka, 2002. (in Russian) [**Жутозов Б. Н., Андриевский А. П.** Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлинёнными зарядами взрывчатых веществ. — Новосибирск: Наука, 2002. — 96 с.]
3. **Aleksandrova N. I. and Sher E. N.** Effect of dilation on rock breaking by explosion of a cylindrical charge, *Journal of Mining Science*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 400–408. [**Александрова Н. И., Шер Е. Н.** Влияние дилатансии при описании разрушения горных пород взрывом цилиндрического заряда // ФТПРПИ. — 1999. — № 4, — С. 75–83.]
4. **Sher E. N. and Chernikov A. G.** Calculation of the parameters of the radial system of cracks formed during the explosion of an elongated charge in fragile rocks, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2015, no. 2, pp. 299–303. (in Russia) [**Шер Е. Н., Черников А. Г.** Расчет параметров радиальной системы трещин, образующейся при взрыве удлинённого заряда в хрупких горных породах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — № 2. — С. 299–303].
5. **Grigoryan S. S.** Some questions of the mathematical theory of deformation and destruction of solid rocks, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1967, vol. 31, no. 4. [**Григорян С. С.** Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПММ. — 1967. — Т. 31. — Вып. 4.]
6. **Rodionov V. N., Adushkin V. V. and Romashev A. N. et al.** Mechanical effect of an underground explosion Moscow, Nedra, 1971. (in Russian) [**Родионов В. Н., Адушкин В. В., Ромашев, А. Н. и др.** Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971. — 221 с.]
7. **Chadwick P., Cox A. D. and Hopkins H. G.** Mechanics of deep underground explosions, Moscow, Mir, 1966, 126 pp. (in Russia) [**Чедвик П., Кокс А., Гопкинсон Г.** Механика глубинных подземных взрывов. — М.: Мир, 1966. — 126 с.]
8. **Crouch S. L. and Starfield A. M.** Boundary element methods in solid mechanics, Moscow, Mir, 1987. (in Russian) [**Крауч С., Старфилд А.** Методы граничных элементов в механике твердого тела. — М.: Мир, 1987. — 326 с.]
9. **Mikhailov A. M.** Calculation of the stresses around a crack in a three-dimensional case, *Journal of Mining Science*, 2000, vol. 36, no. 5, pp. 445–451. [**Михайлов А. М.** Расчет напряжений вокруг трещины в трехмерном случае // ФТПРПИ. — 2000. — № 5. — С. 36–42.]
10. **Kristianovich S. A. and Zheltov Y. P.** Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Fluids, 4th World Petroleum Congress, 6–15 June, Rome, Italy 1955.
11. **Perkins T. K., Kern L. R.** Widths of hydraulic fractures, *Journal of Petroleum Technology*, 1961, vol. 13, no. 9, pp. 937–949.
12. **Geertsma J.** Chapter 4. Two-dimensional fracture propagation models, Recent advances in hydraulic fracturing, Monograph Series, 12, Eds. Gigley J., Holditch S., Veatch D.N.R., Richardson TX: SPE, 1989, vol. 12, pp. 81–94.
13. **Adachi J. I., Detournay E., and Peirce A. P.** An Analysis of the Classical Pseudo-3D Model for Hydraulic Fracture with Equilibrium Height Growth across Stress Barriers. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, 2010, vol. 47, no. 4, pp. 625–632.