РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2023

УДК 622.235.63

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД СБЛИЖЕННЫМИ ШПУРОВЫМИ ЗАРЯДАМИ ПРИ КОНТУРНОМ ВЗРЫВАНИИ

Е. Н. Шер

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

Приведены расчетная схема и результаты расчетов развития магистральных трещин, образующихся при взрыве сближенных шпуровых зарядов в хрупких горных породах. Расчеты в трехмерной постановке выполнены на примере образования щели в граните при контурном взрывании шпуров с зарядами аммонита для разных расстояний между шпурами и степени их заполнения взрывчатым веществом. Определены формы и размеры магистральных трещин, образующихся при взрыве одиночного шпурового заряда и трех сближенных. По результатам расчетов для конкретного шпурового заряда предложен способ определения рационального расстояния между шпурами при контурном взрывании, обеспечивающего максимальную площадь образующейся щели.

Взрыв, горные породы, разрушение, шпуровые заряды, численное моделирование, контурное взрывание

DOI: 10.15372/FTPRPI20230508

Контурное взрывание широко используется при оконтуривании подземных выработок, создании экранов для защиты от волнового воздействия, при формировании бортов карьеров, взрывной разделке мраморных блоков [1-3], при противофильтрационном экранировании горных выработок и тоннелей [4]. Особенностью проведения буровзрывных работ при выполнении контурного взрывания является организация бурения ряда близко расположенных шпуров вдоль предполагаемого разрыва породного массива. Одновременное взрывание зарядов с пониженным погонным расходом BB сопровождается преимущественным развитием разрушения в виде трещины, соединяющей шпуры. После взрыва в породном массиве образуется щель требуемой конфигурации и размеров. Эффективность контурного взрывания зависит от правильного выбора погонного расхода BB в шпурах и расстояния между ними. Экспериментальные данные по этому вопросу, полученные в результате анализа результатов большого объема взрывных работ, приведены в [1, 5]. Расчетные модели оптимального проведения контурного взрывания предложены в [3, 6, 7]. В [7] исследование разрушающего действия скважинного заряда осуществляется в трехмерной постановке с помощью численного метода конечных элементов системы инженерного анализа Ansys – Autodyn. В двухмерной постановке

№ 5

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации 121062200075-4).

приведены примеры расчета развития разрушения при взрыве контурных зарядов. Выявлено наличие локального разрушения вблизи скважин и развитие магистральных трещин, соединяющих скважины.

В настоящей работе моделирование проводилось на примере взрыва трех шпуровых зарядов, расположенных рядом в породном массиве в одной плоскости. Исследовалось влияние расстояния между зарядами, погонного их веса на развитие трещин между ними, их слияние и развитие общей трещины.

Для оценки размеров и формы таких трещин использовалась разработанная в трехмерной постановке задачи программа расчета развития системы равномерно распределенных по углу плоских радиальных трещин, образующихся при взрыве одиночного шпурового заряда [8]. Согласно зонной модели взрыва [9-11], в результате детонации заряда вглубь породы от шпура радиусом *a*₀ распространяется упругая волна сжатия и за ней фронт волны дробления, после остановки которой происходит развитие зоны трещин. Достигнутое на этапе развития зоны дробления расширение упругой среды в последующем сохраняется из-за сопротивления радиальному сжатию раздробленной породы и приводит к развитию в упругой зоне породного массива системы радиальных трещин. При моделировании предполагается, что образование их в упругой плоскости происходит с развития начальной радиальной системы N равномерно распределенных по углу узких трещин прямоугольной формы, начинающихся на оси удлиненного заряда и имеющих размеры, равные длине заряда L и радиальному размеру зоны дробления b. В расчетах принимается, что берега начальных полосок трещин нагружены постоянным давлением *p*_b, равным радиальному напряжению на границе упругой зоны и зоны дробления, обеспечивающему ее смещение, достигнутое на первом этапе взрывного разрушения. Для нахождения формы радиальных трещин в заключительной стадии их развития рассматривается квазистатический процесс роста трещин при последовательном увеличении приложенного к берегам начальных полосок трещин давления до значения *p*_b. На каждом шаге расчета определяется напряженное состояние упругой среды вблизи фронта трещин с целью выявления возможного разрушения среды и развития трещины.

Оценочный расчет величин *b* и p_b проводится в плоской постановке по схеме квазистатического расчета равновесного развития зоны дробления [12, 13]. В расчете учитывается адиабатическое расширение взрывных газов в полости взрыва радиусом *a*, пластическое деформирование раздробленной породы в слое a < r < b и упругое деформирование при r > b. Компоненты тензора напряжения в зоне дробления подчиняются закону Кулона–Мора: $(1+\alpha)\sigma_{\vartheta} - \sigma_r - Y = 0$ $(Y = 2C \cos \varphi / (1-\sin \varphi), \alpha = 2\sin \varphi / (1-\sin \varphi), C$ — модуль сцепления, φ — угол внутреннего трения). Аналогичный закон предлагается в качестве критерия разрушения породы в упругой зоне деформирования на границе с зоной дробления: $(1+\alpha_2)\sigma_{\vartheta} - \sigma_r - Y_2 = 0$ ($\alpha_2 = \sigma_c / \sigma_t - 1, Y_2 = \sigma_c;$ σ_c, σ_t — прочность породы на одноосное сжатие и растяжение). Рассматривается квазистатическое равновесие упругой зоны и зоны дробления, расширяемой под действием давления газов в полости взрыва. При расширении зоны дробления предполагается отсутствие сжимаемости и выполнение закона сохранения массы в виде $a^2 - a_0^2 = b^2 - (b - u_b)^2$, где u_b — радиальное смещение породы на границе упругой зоны и зоны дробления; a_0 — радиус шпура.

С учетом внешнего сжатия горной породы давлением *P* радиальное напряжение на границе упругой зоны и зоны дробления равно [12]:

$$p_b = \frac{Y_2 + 2(1 + \alpha_2)P}{2 + \alpha_2}.$$
 (1)

Относительное смещение внешней границы зоны дробления определяется как

71

$$\frac{u_b}{b} = \frac{1+v}{2+\alpha_2} [Y_2 - 2P(1-v(2+\alpha_2))],$$

v — коэффициент Пуассона упругой среды.

Из условия сохранения массы при деформировании зоны дробления удается вычислить отношение b/a через относительный радиус полости a/a_0 :

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{a_0}{a}\right)^2}{k}}, \quad k = \frac{u_b}{b} \left(2 - \frac{u_b}{b}\right). \tag{2}$$

С учетом этого и условия непрерывности напряжения на границе взрывной полости получаем уравнения для нахождения относительного радиуса взрывной полости $\bar{a} = a / a_0$:

$$p(\overline{a}) + \frac{Y}{\alpha} - \left(\frac{Y}{\alpha} + p_b\right) \left(\frac{\overline{a}^2 - 1}{\overline{a}^2 k}\right)^{\alpha/(2(1+\alpha))}.$$
(3)

Здесь $p(\overline{a})$ — давление газов детонации в полости взрыва в зависимости от ее радиуса. Давление газа в полости взрыва рассчитывается по модифицированной адиабате Джонса–Миллера [11] для тротилового цилиндрического заряда в виде

$$p(a) = \begin{cases} p_0 \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2\gamma_1}, & a \le a^*, \\ p_0 \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-2\gamma_1} \left(\frac{a}{a^*}\right)^{-2\gamma_2}, & a \ge a^*, \end{cases}$$
(4)

где $\gamma_1 = 3$; $\gamma_2 = 1.27$; $a^* / a_0 = 1.89$. Для тротила $p_0 = 1 \cdot 10^{10} \Pi a$. В результате решения трансцендентного уравнения (3) из (2) находится равновесный радиус зоны дробления *b*.

В случае других ВВ плотностью ρ_z и когда радиус заряда a_z меньше радиуса шпура a_0 начальное давление p_0 находится из условия равенства энергии ВВ, идущей на разрушение, работе по расширению газов детонации до атмосферного давления 10^5 Па. Примем, что при заполнении газов детонации всего объема шпура энергия ВВ, не расходуется. Плотность газов в этот момент, начальный для расширения среды, составляет $\rho_0 = \rho_z (a_z / a_0)^2$. Критическая плотность ВВ при которой происходит переход адиабаты Джонса – Миллера с γ_1 на γ_2 , составляет $\rho_* = 420$ кг/м³. Если $\rho_0 < \rho_*$, то давление газов через их объем согласно адиабатическому закону выражается формулой $p = p_0 (V_0 / V)^{\gamma_2}$ и работа по расширению до атмосферного давления p_a составляет $A = (p_0 V_0 - p_a V_a)/(\gamma_2 - 1)$. Приравнивая эту величину энергии взрыва $Q = \rho_0 V_0 E \eta$, где E — удельная энергия ВВ, η — доля энергии, идущей на разрушение [11], для определения p_0 получаем уравнение

$$p_0 - \rho_0 E \eta(\gamma_2 - 1) - p_a \left(\frac{p_0}{p_a}\right)^{1/\gamma_2} = 0$$

При $\rho_0 > \rho_*$ имеем аналогичное уравнение.

Полученные в результате решения этих уравнений значения p_0 определяют адиабату газообразных продуктов детонации (4) и позволяют решить уравнение (3), найти для конкретного заряда и породы радиусы полости *a* и зоны дробления *b* в момент остановки ее развития. Давление на границе зоны дробления p_b вычисляется по (1).

Такие расчеты выполнены для аммонита и гранита. Параметры аммонита следующие: плотность $\rho_z = 1000$ кг/м³, удельная энергия E = 3.83 МДж/кг, КПД взрыва $\eta = 0.333$. Расчеты для гранита проводились при модуле Юнга среды E = 50 ГПа, коэффициенте Пуассона v = 0.3, прочности среды на сжатие 150 МПа, трещиностойкости $K_{IC} = 2.55$ МПа·м^{0.5}, параметрах закона Кулона – Мора $Y = Y_2 = 150$ МПа, $\alpha = 4$, $\alpha_2 = 6.5$. Результаты расчетов для шпура радиусом $a_0 = 2.25$ см и относительным радиусом заряда патронированного аммонита $m = a_z / a_0$ приведены ниже:

т	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$p_0, \Gamma \Pi$ а	0.044	0.075	0.114	0.160	0.279	0.542	0.926	1.430
$b_1 = b / a_0$	1.61	2.40	3.50	4.84	7.65	12.60	17.20	21.00
<i>b</i> , см	3.62	5.40	7.90	10.90	17.20	28.35	38.60	47.20

Для принятых параметров прочностных свойств гранита по (1) рассчитано радиальное напряжение $p_b = 17.8$ МПа. Полученная зависимость $b_1(m)$ представлена на рис. 1*а* квадратными маркерами, гладкая кривая — вид ее интерполяционной зависимости:

$$b_1(m) = 20.274m^2 - 5.45m + 1.24, \qquad (5)$$

вычисленной при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.99$.





Зависимость $b_1(m)$ можно использовать для приближенной оценки поперечного размера равновесной трещины, образуемой при взрыве шпурового заряда. В плоской постановке теории упругости известно решение задачи о напряженном состоянии плоскости с прямолинейным разрезом длиной $2X_{max}(m)$, нагруженным в его центре на площадке длиной 2b давлением p. Согласно этому решению, при $X_{max}(m) >> b$ равновесный размер трещины удовлетворяет соотношению

$$X_{\max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2pb}{K_{IC}} \right)^2.$$
(6)

73

С учетом того, что $b = b_1 a_0$, по (5), (6) можно рассчитать $X_{max}(m)$. Для параметров аммонита и гранита зависимость $X_{max}(m)$ показана на рис. 16 гладкой линией. Приведенные данные использованы для расчета развития плоских трещин при взрыве шпурового заряда.

Расчет трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с радиальной системой N равномерно распределенных по углу плоских трещин, нагруженных внутренним давлением, проводился с использованием метода разрывных смещений [14, 15]. При этом поверхность трещин разбивалась на квадратные элементы с шагом Δ , в пределах которых раскрытие и сдвиги берегов трещины считаются постоянными. Таким образом, трещины представляются набором дислокационных элементов, компоненты вектора Бюргерса которых заранее могут быть неизвестны.

Определяются они из требования выполнения граничных условий в напряжениях в центрах дислокационных элементов при решении соответствующей системы линейных уравнений, коэффициенты которой — коэффициенты взаимного влияния элементов друг на друга. Для вычисления коэффициентов влияния использовались формулы Пича – Келлера [16], позволяющие рассчитать компоненты тензора напряжений в произвольной точке упругого пространства рядом с дислокационным элементом через контурные интегралы вдоль его границы. Эти же формулы использовались для расчета напряжений вблизи кромок трещин для определения возможного их развития. Применительно к контурному взрыванию расчеты проводились для случая развития двух диаметрально противоположных трещин (N=2), возникающих при взрыве удлиненного заряда.

Пример расчета форм трещин, образующихся при камуфлетном взрыве одиночного шпурового заряда диаметром 4.5 см, длиной 2.0 м в граните при разном относительном радиусе заряда аммонита $m = a_z / a_0$, приведен на рис. 2.



Рис. 2. Формы трещин в первом квадранте плоскости *xz*, образующихся при взрывах одиночного шпурового заряда в граните при разном относительном радиусе заряда аммонита m = 0.41 (*l*), 0.50 (*2*), 0.63 (*3*)

Полученные данные о форме и размере трещин, образующихся при взрыве одиночного шпурового заряда, могут использоваться для приближенной оценки рационального расстояния между шпурами h(m) при контурном взрывании. По кривым рис. 2 можно определить максимальную полуширину образующейся трещины $X_{\max}^{1}(m)$ вдоль оси *х*. Ожидаем, что

$$h(m) = 2X_{\max}^{1}(m) + 4b.$$
(7)

Параметры зон дробления для зарядов аммонита, соответствующих рис. 2, вместе с размерами $X_{max}^{1}(m)$ и расчетными по (7) значениями h(m) приведены ниже:

т	0.41	0.50	0.63
p_b , МПа	17.8	17.8	17.8
$b_1 = b / a_0$	2.5	3.5	5.3
<i>b</i> , см	5.6	7.9	12.0
$X^1_{ m max}$, см	19.6	35.0	60.0
<i>h</i> (<i>m</i>), см	62.0	102.0	168.0
hr(m), см	67.0	107.0	173.0

Значения максимальной полуширины трещин $X_{\max}^{1}(m)$ представлены маркерами на рис. 16 в зависимости от относительного к радиусу шпура радиуса заряда аммонита *m*. Значения $X_{\max}^{1}(m)$, полученные в трехмерном расчете разрушающего действия взрыва одиночного удлиненного заряда, близки к результатам двухмерного расчета по формулам (5), (6).

В настоящей работе развитие трещин, образующихся при взрыве шпуровых зарядов при контурном взрывании, моделировалось расчетом развития трещин трех близко расположенных в плоскости *xz* зарядов (рис. 3).



Рис. 3. Принятая в расчетах схема расположения трех смежных зарядов

На рис. 4*a* показаны формы развивающихся трещин для зарядов с m = 0.63. Кривые 1, 2, 3 соответствуют формам трещин на 6-м, 8-м и 10-м шаге роста трещин (точки A, B, C на рис. 4 δ).



Рис. 4. Формы трещин в первом квадранте плоскости xz при пошаговом росте раскрывающего их давления (*a*) и зависимость, связывающая относительный размер радиуса зоны дробления и площадь образованной на каждом шаге трещины (δ)

Из рис. 46 видно, что после достижения в точке A значения $b_1 = 5.30$, соответствующего заряду m = 0.63, дальнейшее развитие трещины происходит скачком в положение точки C, так как промежуточные формы трещин требуют меньшей нагрузки, чем в точке A. Расстояние

между зарядами в этом расчете можно считать рациональным для заряда m = 0.63, поскольку обеспечивает объединение всех трещин и получение максимальной их площади при взрыве. Такие рациональные расстояния hr(m) приведены выше. Сравнение их значений с предполагаемыми подтверждает, что приближенный расчет h(m) по формуле (7) может служить ориентиром при определении hr(m).

Для оценки значимости увеличения расчетной площади трещины при взрыве удлиненных зарядов, расположенных на оптимальном расстоянии, по сравнению с площадью трещины одиночного заряда, на рис. 5 приведены зависимости этих площадей от относительного радиуса заряда.



Рис. 5. Зависимости площади трещины в первом квадранте плоскости *xz*, приходящейся на один заряд при взрыве в ряду трех зарядов (1) и одиночного заряда (2) от относительного радиуса заряда

Установлено, что при взрыве зарядов, расположенных на оптимальном расстоянии, расчетная площадь трещины, приходящейся на один заряд, примерно в 2 раза больше, чем у одного заряда. Это открывает возможность рационального проведения взрывных работ при контурном взрывании.

выводы

Разработана расчетная схема определения размеров зоны дробления при взрыве шпурового заряда с неполным его заполнением взрывчатым веществом. Проведены расчеты для шпуровых зарядов аммонита, взрываемых в граните. Полученные данные использованы при разработке программ для расчетов формы и размеров плоских трещин, возникающих при взрыве шпурового заряда в хрупких горных породах.

Выполнены в трехмерной постановке расчеты формы и размеров плоских трещин, возникающих при камуфлетном взрыве шпурового заряда в граните при разной степени заполнения его аммонитом. Показано, что по максимальным значениям поперечного размера трещины можно сделать оценку рационального расстояния между шпуровыми зарядами при контурном взрывании. Моделирование развития трещины при контурном взрывании проведено расчетами роста трещин при одновременном взрыве трех смежных зарядов. Подтверждена возможность определения оптимального расстояния между шпурами при контурном взрывании на основе данных расчета размера трещины, образованной взрывом одиночного шпурового заряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Густафссон Р. Шведская техника взрывных работ. М.: Недра, 1977. 264 с.
- **2. Бротанек И., Вода Й.** Контурное взрывание в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1983. 144 с.
- 3. Флягин А. С., Жариков С. Н. О контурном взрывании при ведении горных работ // Взрывное дело. 2015. № 114/71. С. 194–201.
- **4.** Шилова Т. В., Сердюков С. В. Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок через вмещающие породы // ФТПРПИ. 2015. № 5. С. 179–186.
- 5. Эшонкулов У. Х., Олимов Ф. М., Саидахмедов А. А. и др. Обоснование параметров контурного взрывания при сооружении горных выработок большого сечения в крепких породах // Достижение науки и образования. 2018. № 19 (41). С. 10–13.
- **6. Жариков С. Н., Шеменев В. Г.** О влиянии взрывных работ на устойчивость бортов карьеров // Горн. журн. — 2013. — № 2. — С. 80-83.
- 7. Козырев С. А., Камянский В. Н. Разработка численных моделей взрыва скважинных зарядов в массиве горных пород // Вестн. КНЦ РАН. 2019. № 2 (11). С. 34–44.
- 8. Шер Е. Н., Черников А. Г. Расчет параметров радиальной системы трещин, образующейся при взрыве удлиненного заряда в хрупких горных породах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2015. № 2. С. 299–303.
- **9.** Григорян С. С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПММ. 1967. Т. 31. Вып. 4. С. 643–669.
- **10.** Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, А. Н. Ромашев и др. М.: Недра, 1971. 221 с.
- **11. Чедвик П., Кокс А., Гопкинсон Г.** Механика глубинных подземных взрывов. М.: Мир, 1966. 126 с.
- **12.** Шер Е. Н. Моделирование развития трещин в слоистом породном массиве при взрыве скважинных зарядов и гидроразрыве // ФТПРПИ. 2020. № 6. С. 42–53.
- **13.** Шер Е. Н., Александрова Н. И. Динамика развития зоны дробления в упругопластической среде при камуфлетном взрыве шнурового заряда // ФТПРПИ. 1997. № 6. С. 43–49.
- 14. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. М.: Мир, 1987. 326 с.
- 15. Михайлов А. М. Расчет напряжений вокруг трещины в трехмерном случае // ФТПРПИ. 2000. № 5. С. 445–451.
- Peach M. and Koehler J. S. The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them, Phys. Rev., 1950, Vol. 80, No. 3. — P. 436–440.

Поступила в редакцию 10/VIII 2023 После доработки 05/IX 2023 Принята к публикации 15/IX 2023