



**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, ОСЛОЖНЕННЫЙ ПОЛОСТЬЮ
И ТЕКТОНИЧЕСКИМ НАРУШЕНИЕМ**

Г. Н. Хан, Е. П. Русин

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

Рассмотрено воздействие взрыва на массив горных пород, осложненный полостью и расположенной в ее окрестности тектоническим нарушением в виде протяженного разупрочненного породного слоя. Показано, что данный слой снижает эффективность динамического воздействия на полость. Выявлена зависимость устойчивости полости при взрыве от мощности разупрочненного слоя и прочностных характеристик массива.

Метод дискретных элементов, тектоническая неоднородность, разупрочненный слой, заряд, ударная волна

**SIMULATION OF DYNAMIC IMPACT ON THE ROCK MASS COMPLICATED
WITH A CAVITY AND TECTONIC DISTURBANCE BY DISCRETE ELEMENT METHOD**

G. N. Khan and E. P. Rusin

*Chinakal Mining Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: gmmlab@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The effect of a blast on a rock mass complicated with a cavity and tectonic heterogeneity is considered. The heterogeneity is an extended softened rock layer located in the vicinity of the cavity. It is shown that this layer reduces the effectiveness of dynamic effect on the cavity. The dependence of cavity stability during the blast on thickness of the softened layer and strength properties of the rock mass is revealed.

Discrete element method, tectonic heterogeneity, softened layer, charge, shock wave

Как известно, между горными породами и сыпучими материалами обнаруживается сходство [1–4] и, в частности, в том, что горные породы обладают важнейшим свойством сыпучей среды — дилатансией. В методе дискретных элементов (МДЭ) [5] моделируемая среда представляется совокупностью частиц — дискретных элементов, для которых выполняются уравнения динамики твердого тела. В настоящее время МДЭ широко применяется для исследования механических, в том числе, динамических, процессов, протекающих в массиве горных пород [6, 7]. Взаимодействие между частицами описывается посредством возникающих на их контактах сил. При постановке задачи задаются физико-механические характеристики элементов, краевые условия, начальное распределение частиц в пространстве и начальное распределение их линейных и угловых скоростей. После этого решается задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. МДЭ автоматически учитывает дилатансию — свойство, которое является одним из определяющих для формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород до и после их разрушения.

В данной работе методом дискретных элементов исследуется влияние воздействия взрывной волны на НДС массива горных пород, осложненного полостью и содержащего тектоническое нарушение. При этом используется модификация предложенной в [8] и апробированной при решении динамических задач [9] математической модели среды, основанной на линейной вязкоупругой модели [10].

На рис. 1 приведена расчетная схема: прямоугольная область l размером $a \times b$, заполнена дискретными элементами, моделирующими двумерный массив горных пород. Граница области счета составлена из граничных дискретных элементов (ГДЭ), для которых заданы краевые условия: линейная и угловая скорости ГДЭ нижней и боковых сторон равны нулю, ГДЭ верхней являются обычными дискретными элементами и сверху свободны от напряжений.

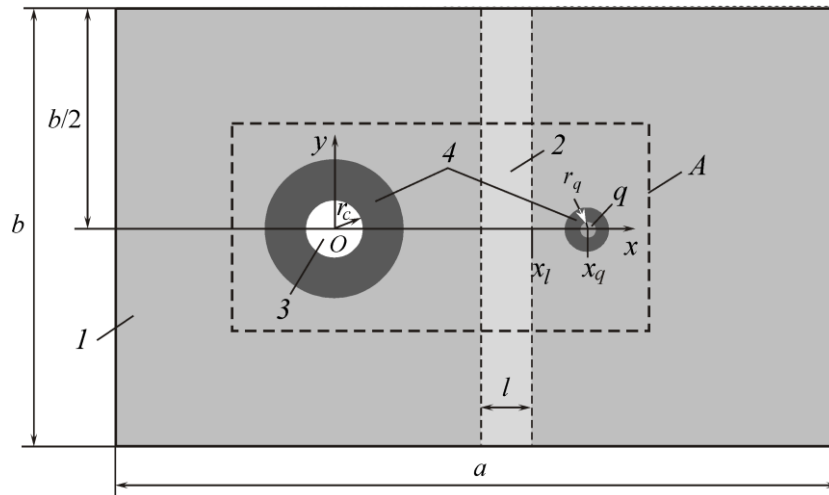


Рис. 1. Схема расчета: a, b — размеры расчетной прямоугольной области; l — массив горных пород, моделируемый дискретными элементами с радиусами r из заданного диапазона значений; 2 — тектоническое нарушение в виде вертикального слоя шириной l ; 3 — полость радиусом r_c ; 4 — участки массива, составленные из дискретных элементов меньших, чем в остальной части массива, размеров; Oxy — система координат, начало O которой совмещено с центром полости 3 ; x_l — расстояние от точки O до дальней границы слоя; q — заряд взрывчатого вещества, составленный из дискретных элементов, расположенных в круге с радиусом r_q и центром в точке $(x_q, 0)$; A — фрагмент расчетной области

В массиве находятся тектоническое нарушение 2 в виде разупрочненного, имеющего нулевое сцепление прямоугольного слоя шириной l и круглая полость 3 радиусом r_c , центр которой расположен на глубине $b/2$. Начало O выбранной декартовой системы координат Oxy совмещено с центром полости. Сила тяжести направлена против оси Oy . Дальняя от полости граница слоя 2 расположена на расстоянии x_l от точки O . Заряд q взрывчатого вещества (ВВ) моделируется дискретными элементами, расположенными в пределах круга радиуса r_q с центром в точке $(x_q, 0)$. Подрывание ВВ моделируется путем задания дискретным элементам заряда в момент $t_0 = 0$ начальных скоростей v_q , направленных от точки $(x_q, 0)$ к центрам элементов заряда.

Элементы с различными радиусами r имеют характеристики ρ, E — плотность и модуль упругости соответственно. На контактах между элементами задаются следующие параметры: φ — угол контактного трения; C — сцепление; ε — деформация разрыва сцепления; k — коэффициент восстановления. Слой 2 сложен из дискретных элементов с теми же характеристиками, что и у частиц массива, за исключением сцепления $C_l = 0$ и модуля упругости E_l , т. е. тектоническое нарушение представляет собой сыпучий материал — раздробленную породу.

Радиус r элементов в зонах 4 и области заряда радиусом $r_q = 0.25$ м выбран из значений, равномерно распределенных в диапазоне от 0.04 до 0.05 м, в остальной части массива — от 0.20 до 0.25 м. Меньшие размеры элементов в зонах 4 позволяют более детально промоделировать процесс деформирования массива в окрестностях полости и заряда при взрыве. Физико-механические характеристики элементов массива горных пород приняты следующими: $\rho = 2500$ кг/м³, $E = 10$ ГПа, $k = 0.3$, $\varphi = 17^\circ$, $\varepsilon = 0.05$. Расчеты проводились для различных значений сцепления $C = 5, 10, 15, 20$ МПа. Модуль упругости E_1 элементов слоя 2 принят равным 50 МПа. Размеры расчетной области: $a = 50$ м, $b = 30$ м, радиус полости $r_c = 2$ м, расстояния от ее центра до дальней от нее границы слоя и до центра заложения заряда — соответственно $x_l = 14$ м, $x_q = 18$ м. Ширина l слоя в различных вариантах расчетов выбиралась от 0 до 8 м с интервалом 2 м.

Поиск энергии ВВ, необходимой для разрушения полости, осуществлялся путем проведения серии расчетов с различными значениями энергии методом бисекции. Под разрушением полости понимается разрыв контактов сцепления в массиве в ее окрестности. На рис. 2 показаны фрагмент А расчетной области массива горных пород на двух промежуточных стадиях t_1 и t_2 развития фронта Φ ударной волны, возникающей в массиве без тектонического нарушения (рис. 2а) и с нарушением шириной $l = 4$ м (рис. 2б) в результате подрывания зарядов q_0 с энергией $W_0 = 0.83$ ГДж и q_4 с энергией $W_4 = 3.00$ ГДж, необходимой для разрушения полости. Нижние индексы в обозначениях зарядов и их энергий соответствуют ширине l слоя 2.

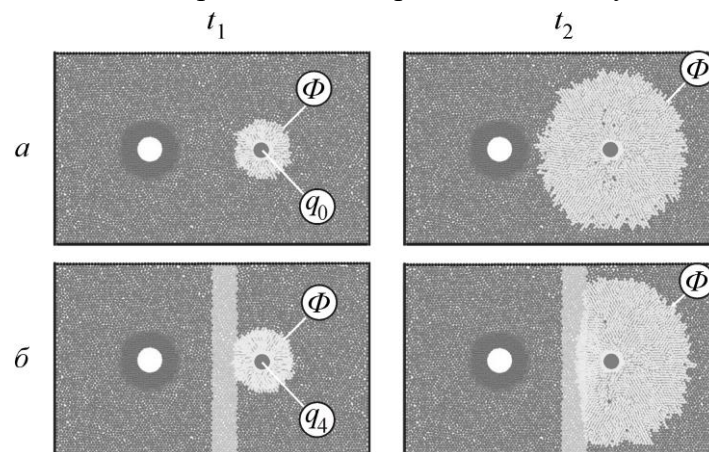


Рис. 2. Промежуточные стадии t_1 и t_2 развития ударной волны, приводящей к потере устойчивости полости при $C = 5$ МПа для ширины l равной, м: а — 0; б — 4

Видно, что в отсутствии тектонического нарушения (рис. 2а) в результате подрывания заряда ВВ в массиве распространяется цилиндрическая ударная волна. При наличии разупрочненного слоя (рис. 2б) фронт Φ ударной волны теряет в нем скорость (рис. 2б, стадия t_2) и часть своей энергии из-за существенно меньшего модуля упругости и отсутствия сцепления между элементами, составляющими слой. При силовом воздействии на среду модуль упругости в слое меньший, чем в массиве, приводит к большей деформации слоя, соответственно большей диссипации энергии в нем, чем в массиве. Кроме того, в сыпучей среде тектонического нарушения происходит диссипация энергии за счет трения между частицами среды. Поэтому в слое 2 фронт Φ ударной волны теряет скорость и, соответственно, свою энергию. Следовательно, для разрушения полости в массиве с тектоническим нарушением требуется заряд большей мощности, чем в массиве без него, при одинаковом удалении заряда от полости. Присутствие разупрочненного слоя, расположенного между полостью и зарядом, приводит к искажению фронта Φ ударной волны и эффекту защиты или экранирования слоем полости от динамического воздействия, возникающего вследствие подрывания заряда.

На рис. 3 изображены деформационные картины в момент начала потери полостью устойчивости при взрыве зарядов q_2 , q_4 , q_6 и q_8 с энергиями $W_2 = 2.13$, $W_4 = 3.00$, $W_6 = 3.67$, $W_8 = 4.03$ ГДж в массиве с разупрочненным слоем шириной l равной соответственно 2, 4, 6 и 8 м при $C = 5$ МПа. Результаты расчетов показывают, что с увеличением l требуется увеличение заряда q , необходимого для разрушения полости. Виден важный эффект, сопутствующий воздействию на массив сжимающих напряжений: при потере полостью устойчивости трещина разрушения в окрестности полости имеет вид спирали от границы полости вглубь массива. Это соответствует характеру развития трещин в массиве в окрестности круглой полости в виде поверхностей скольжения Людерса – Чернова, наблюдаемых в физических экспериментах при сжатии образца горной породы с круглым отверстием [11].

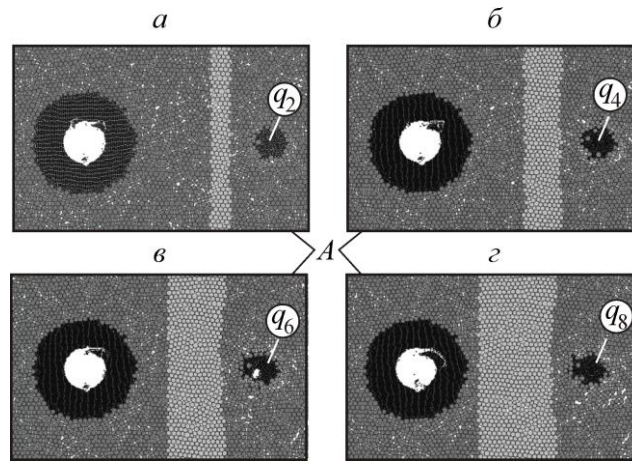


Рис. 3. Стадия потери устойчивости полости в массиве горных пород со сцеплением $C = 5$ МПа и подрыванием зарядов: a — q_2 с энергией $W_2 = 2.13$ ГДж; b — q_4 с энергией $W_4 = 3.00$; v — q_6 с энергией $W_6 = 3.67$, z — q_8 с энергией $W_8 = 4.03$ ГДж в массиве со слоем шириной l , равной 2, 4, 6, 8 м

На рис. 4 представлены расчетные зависимости энергии W подрываемого заряда q , необходимой для потери полостью устойчивости, от ширины l разупрочненного слоя при фиксированном значении $x_q = 18$ м и различных значениях сцепления C в массиве.

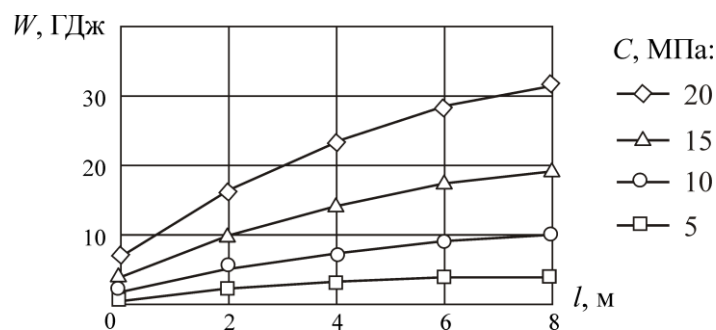


Рис. 4. Зависимость энергии W заряда, необходимой для разрушения полости радиусом 2 м, от ширины l разупрочненного слоя при различных значениях сцепления C массива горных пород

На основе анализа графиков, представленных на рис. 4, получена эмпирическая формула для расчета энергии для $l > 0$

$$W = kC^{3/2}l^{1/2},$$

где $k = 0.124$ при заданном значении $x_q = 18$ м. Максимальное расхождение между значениями энергии, рассчитанными по данной эмпирической формуле и методом дискретных элементов, не превышает 8 %.

ВЫВОДЫ

Тектоническое нарушение в виде разупрочненного слоя, расположенного в массиве между полостью и источником взрыва, ослабляет воздействие ударной волны на полость. При потере полостью устойчивости наблюдается развивающаяся от ее границы вглубь массива спиралевидная трещина. Это соответствует характеру развития трещин в массиве в окрестности круглой полости в виде поверхностей скольжения Людерса–Чернова, наблюдаемых в физических экспериментах при сжатии образца горной породы с круглым отверстием. Получена эмпирическая формула для расчета энергии разрушения полости в зависимости от величин сцепления и ширины разупрочненного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Terzaghi K.** Theoretische Bodenmechanik, Berlin-Göttingen-Hedelberg, Springer, 1954. [Терцаги К. Теория механики грунтов. — М.: Стройиздат, 1961. — 507 с.]
2. **Revuzhenko A. F., Stazhevskii S. B., and Shemyakin E. I.** Structural-Dilatancy Strength of Rocks, Proceedings of the Academy of Sciences SSSR, 1989, vol. 305, no. 5, pp. 1077–1080 (in Russian). [Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е. И. О структурно-дилатансионной прочности горных пород // ДАН СССР. — 1989. — Т. 305. — № 5. — С. 1077–1080.]
3. **Sadovskij M. A.** Geophysics and explosion physics. Selected Works, Moscow, Nauka, 2004. (in Russian) [Садовский М. А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. — М.: Наука, 2004. — 440 с.]
4. **Goldin S. V.** Dilatancy, repacking, and earthquakes, Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 2004, vol. 40, no. 10, pp. 817–832. [Гольдин С. В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. — 2004. — № 10. — С. 37–54.]
5. **Cundall P. A. and Strack O. D. L.** A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 1979, vol. 29, no. 1, pp. 47–65.
6. **Huang X., Qi S., Williams A., et al.** Numerical simulation of stress wave propagating through filled joints by particle model, Int J Solids Struct, 2015, vol. 69–70, no. 3, pp. 23–33.
7. **Resende R., Fortunato E., Andrade C., Miranda T.** Vibration propagation in discrete element particle models of rock, Alejano, Perucho, Olalla & Jiménez (eds), Rock engineering and rock mechanics: structures in and on rock masses. Proceedings of Eurock 2014, ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014, London: Taylor & Francis Group, pp. 871–876.
8. **Khan G. N.** Asymmetric failure of the rock mass near a hollow, Physical mesomechanics, 2008, vol. 11, no. 1, pp. 109–114. (in Russian) [Хан Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 109–114.]
9. **Khan G. N.** Discrete element modeling of rock failure dynamics, Journal of Mining Science, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 96–102. [Хан Г. Н. Моделирование методом дискретных элементов динамического разрушения горной породы // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 110–117.]
10. **Kruggel-Emden, H., Simsek E., Rickelt S. et. al.** Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method, Powder Technol., 2007, vol. 171, no. 3, pp. 157–173.
11. **Zischinsky U.** Effects of rock bolts in tunneling, Widmann (ed.), Anchor in theory and practice. Proceedings of the International Symposium on Anchors in Theory and Practice, Salzburg, Austria, 9-10 October 1995, Rotterdam: Balkema, 1995.