УДК 622.235

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПЛОСКИХ РАДИАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ВЗРЫВЕ УДЛИНЕННЫХ ШПУРОВЫХ И СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

Е. Н. Шер

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

Разработаны численные схемы определения формы и размеров радиальных трещин, образующихся при камуфлетном взрыве удлиненных зарядов, расположенных в монолитном массиве породы на большой глубине и вблизи его поверхности. Исследовано влияние длины заряда на размеры радиальных трещин при камуфлетном взрыве. Определена величина недозаряда скважинного или шпурового заряда, при которой площадь радиальных трещин максимальна.

Ключевые слова: взрыв, скважинные заряды, шпуровые заряды, радиальные трещины, форма трещин, трехмерное моделирование.

DOI: 10.15372/PMTF20170520

При взрыве удлиненных шпуровых и скважинных зарядов в хрупкой монолитной горной породе основной объем разрушений приходится на зону радиальных трещин. Для оценки размеров и формы таких трещин, образующихся при взрыве удлиненного заряда, разработана программа расчета развития системы равномерно распределенных по углу плоских радиальных трещин. Рассмотрены случаи взрыва удлиненного заряда, расположенного на большой глубине и вблизи свободной поверхности.

В соответствии с зонными моделями взрыва [1–5] после детонации заряда вглубь породы от скважины распространяются упругая волна сжатия и за ней фронт волны дробления. По мере их распространения напряжения в упругой волне уменьшаются, и движение фронта волны дробления замедляется. При уменьшении скорости ее развития до значения, равного максимальной скорости распространения трещин, и при появлении растягивающих азимутальных напряжений возможно образование и развитие радиальных трещин. 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 дальнейшем сохраняется вследствие сопротивления радиальному сжатию раздробленной породы, деформирующейся в соответствии с законом сухого трения. Такое расширение приводит к развитию в упругой зоне массива породы системы радиальных трещин. Поскольку окончательные размеры радиальных трещин при взрыве оказываются значительно больше радиуса зоны дробления, при моделировании полагается, что их развитие в упругом пространстве начинается с развития начальной радиальной

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-05-00156).

системы N плоских трещин прямоугольной формы, примыкающих к оси заряда и имеющих поперечный размер l_0, равный радиальному размеру зоны дробления. Предполагается, что берега этих трещин нагружены давлением p, обеспечивающим среднее раскрытие трещин d_0, соответствующее смещению границы упругой зоны и зоны дробления, достигнутому на первом этапе взрывного разрушения. Для определения формы радиальных трещин на заключительной стадии их развития, которое происходит в динамическом режиме, рассматривается квазистатический процесс развития трещин при постепенном увеличении нагружающего давления p. Для того чтобы выявить возможность разрушения среды и развития трещины, на каждом шаге расчета, включая начальный, определяется напряженное состояние упругой среды вблизи фронта трещин.

Для расчета трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с радиальной системой равномерно распределенных по углу плоских трещин, нагруженных внутренним давлением, использовался метод разрывных смещений. Аналогичный метод для случая плоского деформирования разработан С. Краучем и А. Старфилдом [6] и в настоящее время используется как один из вариантов метода граничных элементов в механике твердого тела. В этом методе [7–9] поверхность трещины аппроксимируется совокупностью дислокационных петель C_k с неизвестными скачками смещений $\boldsymbol{b}_k$ ($k = 1, 2, \ldots, n$). Каждая такая петля C_k, ограничивающая поверхность S_k с постоянным скачком смещений $\boldsymbol{b}_k$, порождает в безграничном упругом пространстве деформационное поле, называемое полем дислокационной петли C_k с вектором Бюргерса $\boldsymbol{b}_k$ [10]. Из таких полей складывается решение задачи о напряженном состоянии упругого пространства с трещинами. Для определения напряжений, порождаемых отдельным дислокационным элементом, ограниченным контуром Γ с координатами $(\xi(t), \eta(t), \zeta(t))$, в трехмерном случае используются формулы Пича — Келера [10]

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{4\pi} \oint\limits_{\Gamma} d\xi \,\Big[b_y\Big(3L\,\frac{ZX^2}{R^5} - M\,\frac{Z}{R^3}\Big) - b_z\Big(3L\,\frac{YX^2}{R^5} - M\,\frac{Y}{R^3}\Big)\Big] +$$
$$+ d\eta \,\Big[b_z\Big(3L\,\frac{X^3}{R^5} - L\frac{X}{R^3}\Big) - b_x\Big(3L\,\frac{ZX^2}{R^5} + L\,\frac{Z}{R^3}\Big)\Big] +$$
$$+ d\zeta \,\Big[b_x\Big(3L\,\frac{YX^2}{R^5} + L\,\frac{Y}{R^3}\Big) - b_y\Big(3L\,\frac{X^3}{R^5} - L\,\frac{X}{R^3}\Big)\Big],$$

$$\sigma_{yz} = \frac{1}{4\pi} \oint\limits_{\Gamma} d\xi \,\Big[b_y\Big(3L\,\frac{YZ^2}{R^5} - L\,\frac{Y}{R^3}\Big) - b_z\Big(3L\,\frac{ZY^2}{R^5} - L\,\frac{Z}{R^3}\Big)\Big] +$$
$$+ d\eta \,\Big[b_y\Big(\mu\,\frac{X}{R^3}\Big) + b_z\Big(3L\,\frac{XYZ}{R^5}\Big) - b_x\Big(3L\,\frac{YZ^2}{R^5} - N\,\frac{Y}{R^3}\Big)\Big] +$$
$$+ d\zeta \,\Big[b_z\Big(-\mu\,\frac{X}{R^3}\Big) + b_x\Big(3L\,\frac{ZY^2}{R^5} - N\,\frac{Z}{R^3}\Big) - b_y\Big(3L\,\frac{XYZ}{R^5}\Big)\Big].$$

Здесь (ξ, η, ζ) — точки на контуре дислокации; R — расстояние между точкой наблюдения (x, y, z) и точкой контура; X, Y, Z — разность координат точки наблюдения и точки контура; b_x, b_y, b_z — компоненты вектора Бюргерса; L, M, N — параметры, определяемые упругими модулями Ламе:

$$L = \frac{2\lambda\mu + 2\mu^2}{\lambda + 2\mu}, \qquad M = \frac{2\mu^2}{\lambda + 2\mu}, \qquad N = \frac{\lambda\mu}{\lambda + 2\mu}.$$

Остальные компоненты тензора напряжений получаются путем циклической перестановки координат и компонент вектора Бюргерса. Векторы $\boldsymbol{b}_k$ определяются из системы линейных

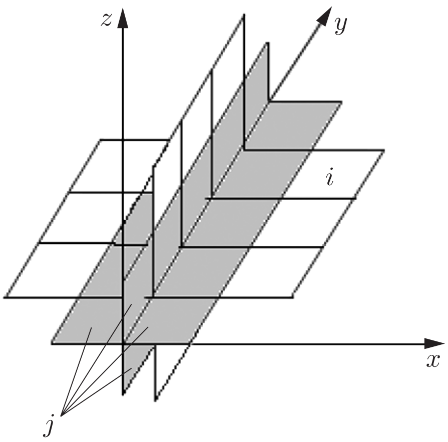

Рис. 1. Разбиение системы радиальных трещин на квадратные дислокационные элементы при $N = 4$:
заштрихованные элементы — элементы начальной конфигурации трещин с одинаковой величиной раскрытия

уравнений, составленной таким образом, чтобы на поверхности трещины выполнялись граничные условия в напряжениях.

Для упрощения задачи рассматривается случай развития системы радиальных трещин, состоящей из N плоских трещин одинаковой формы, распределенных равномерно по углу вокруг скважины. При нагружении берегов трещин нормальными усилиями (сдвиговые напряжения равны нулю) в такой конфигурации трещин поля смещений и напряжений характеризуются периодичностью по углу, при этом их особенностью является отсутствие сдвигов и сдвиговых напряжений в плоскостях, где располагаются трещины. Поэтому на берегах трещин сдвиги отсутствуют и имеет место только раскрытие. Вследствие этого в три раза уменьшается число неизвестных компонент вектора Бюргерса, соответствующих дислокационным площадкам, на которые разбиваются трещины. Значительное уменьшение числа неизвестных достигнуто также с учетом того, что все трещины имеют одинаковые форму и распределение величины раскрытия их берегов. В разработанной программе области трещины и неразрушенной среды в ее плоскости разбивались на квадраты с использованием квадратной сетки с шагом a. При расчетах коэффициентов влияния j-го квадрата на i-й нормальные напряжения на берегах трещин находились в центрах i-х квадратов в результате суммирования напряжений от N дислокационных элементов всех трещин, соответствующих по симметрии j-му квадрату (рис. 1). На рис. 1 показано разбиение системы трещин на квадратные элементы при $N = 4$. Заштрихованы дислокационные элементы начальной конфигурации трещин. К этим элементам приложено внутреннее давление, обеспечивающее их раскрытие, на остальных элементах давление равно нулю.

Для расчета развития трещин необходимо ввести критерий разрушения на кромке трещины, в качестве которого принимается критерий Новожилова. В соответствии с этим критерием развитие трещины происходит в тех областях, где осредненные по характерному размеру l_c растягивающие напряжения больше прочности среды на растяжение σ_c. Учитывая корневую особенность поведения напряжений вблизи кромки трещины, можно установить связь этого критерия с критерием Ирвина, в соответствии с которым развитие трещины происходит в случае, когда коэффициент интенсивности напряжений K_{I} (КИН) на кромке трещины больше его критического значения: $K_{\mathrm{I}} \geqslant K_{\mathrm{I}c}$. При этом интервал осреднения l_c, представляющий собой параметр, характеризующий среду, выражается через критический КИН и прочность на растяжение: $l_c = (2/\pi)(K_{\mathrm{I}c}/\sigma_c)^2$. В расчетах принималось, что шаг сетки разбиения трещин $a = l_c$ и осредненные значения напряжений в неразрушенной среде на кромке трещины в ее плоскости равны напряжениям в центрах квадратов, окружающих ее.

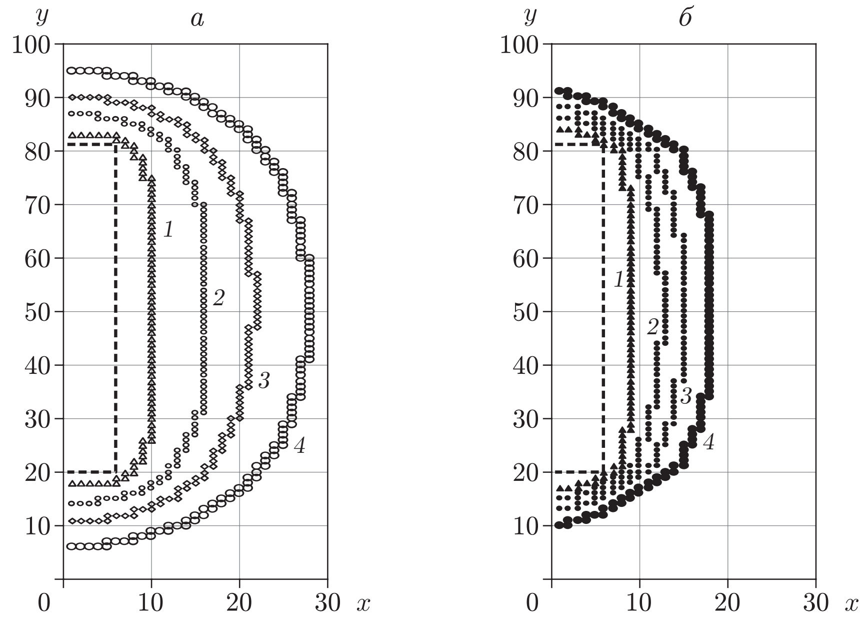

Рис. 2. Формы радиальных трещин, развивающихся из начальных прямоугольных трещин (штриховые линии) при постепенном увеличении давления: *а* — $N = 2$, *б* — $N = 8$; *1–4* — шаги нагружения

Расчет развития трещины проводился по шагам. На каждом шаге для заданной конфигурации трещины и нагружения вычислялись коэффициенты матрицы определяющей системы уравнений. В результате решения этой системы определялись значения величины раскрытия трещины. Рассчитывались напряжения в центрах квадратов, примыкающих к кромке трещины. Эти квадраты, в которых в соответствии с принятым критерием происходило разрушение, присоединялись к трещине. После определения новой формы трещины и корректирования параметров нагружения расчеты циклически повторялись. В результате определялась эволюция формы трещины при ее равновесном развитии под действием возрастающей нагрузки.

На рис. 2 в качестве примера приведены в безразмерном виде результаты расчетов развития радиальной трещины в плоскости (x, y) для систем из двух и восьми трещин. В качестве единицы длины принят шаг расчетной сетки.

Расчеты проводились при следующих значениях параметров: модуль Юнга $E = 3 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$, прочность на растяжение $\sigma_c = 6 \cdot 10^7$ Па, шаг расчетной сетки $a = 10^{-2}$ м, поперечный размер начальных трещин $l_0 = 4 \cdot 10^{-2}$ м.

Сравнение форм трещин на рис. 2,*а*,*б* показывает, что при увеличении числа трещин в радиальной системе существенно уменьшаются их размеры при одинаковой суммарной величине раскрытия начальных трещин, которая задается взрывом на этапе интенсивного сдвигового дробления.

Помимо влияния числа радиальных трещин N исследовалось влияние параметров, характеризующих конструкцию шнурового заряда: его длины L, поперечного размера начальных трещин l_0, принимаемого согласно выбранной модели равным радиусу зоны дробления удлиненного заряда, величины раскрытия начальных трещин d_0, пропорциональной радиусу заряда и определяемой необратимым расширением зоны упругого деформирования горной породы, вызванным деформированием ее на этапе развития зоны дробления. Значения указанных параметров можно рассчитать по разработанным ранее в рамках зонной модели расчетным схемам определения разрушающего действия взрыва бесконечно длинного цилиндрического заряда в монолитной горной породе [5].

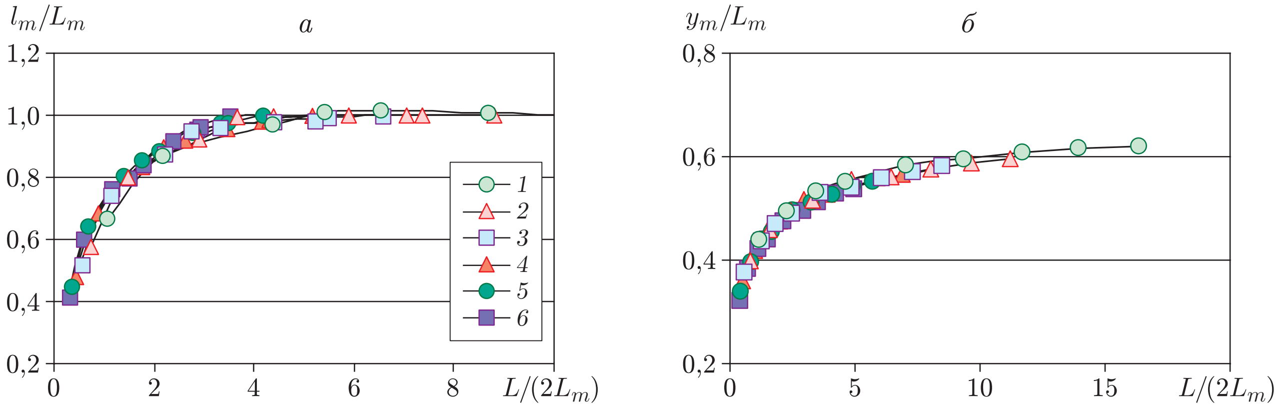

Рис. 3. Зависимости приращения поперечного (*а*) и продольного (*б*) размеров радиальных трещин от безразмерной длины заряда при различных значениях средней величины раскрытия начальных трещин:
1 — $d_0 = 0{,}3$, *2* — $d_0 = 0{,}4$, *3* — $d_0 = 0{,}5$, *4* — $d_0 = 0{,}6$, *5* — $d_0 = 0{,}7$, *6* — $d_0 = 0{,}8$

Анализ полученных данных показывает, что отдельные трещины радиальной системы в плане имеют форму полуовала, охватывающего полосу начальной трещины длиной L, расположенной вдоль оси заряда. При увеличении величины раскрытия начальных трещин, пропорциональной диаметру заряда при постоянной его длине, происходит переход от полуовальной формы трещины к форме полуокружности (см. рис. 2,*а*).

Поперечные размеры трещин зависят от длины заряда и величины раскрытия начальных трещин d_0. При увеличении длины заряда поперечные размеры трещин стремятся к асимптотическому значению L_m, соответствующему бесконечно длинному заряду.

Установлено, что при выборе в качестве единицы длины предельного значения L_m зависимости максимального значения относительного приращения поперечного и продольного размеров трещины l_m/L_m и y_m/L_m от безразмерной длины заряда $L/(2L_m)$ слабо зависят от величины раскрытия d_0 (рис. 3). При этом с увеличением длины заряда выход на асимптотическое значение поперечного размера трещины L_m происходит при $L/(2L_m) = 3 \div 4$ (см. рис. 3,*а*). Заряды большего размера можно рассматривать в качестве бесконечно длинных.

На рис. 3 видно, что радиальная трещина, образующаяся при взрыве шнурового заряда, в торцевом направлении вдоль его оси увеличивается в меньшей степени, чем в поперечном направлении. Это различие увеличивается с ростом длины заряда и при $L/(2L_m) > 5$ $y_m \approx 0{,}6L_m$ (см. рис. 3,*б*).

В случае когда удлиненный шпуровой или скважинный заряд заглублен относительно поверхности горной породы, при определении формы и размеров зоны радиальных трещин необходимо учитывать влияние этой поверхности. Для этого в упругое пространство (см. рис. 1) вдоль предполагаемой свободной поверхности (x, z) вводится свободная от нагрузок плоская трещина большого по сравнению с длиной заряда размера.

Для сохранения свойств симметрии радиальной системы трещин, образующихся при взрыве, разбиение дополнительной трещины в плоскости (x, z) проводится с учетом такой симметрии. При $N = 2$, 4 разбиение дополнительной трещины квадратной сеткой, ориентированной вдоль осей x и z, обладает необходимой симметрией. Пример такого разбиения трещины, моделирующей свободную поверхность, приведен на рис. 4. Элементы $J_1, \ldots, J_4$ дополнительной трещины, расположенные симметрично относительно осей x и z, имеют значения компонент векторов Бюргерса, соответствующие этой симметрии, в частности одинаковые величины раскрытия вдоль оси y. Это позволяет уменьшить в четыре раза

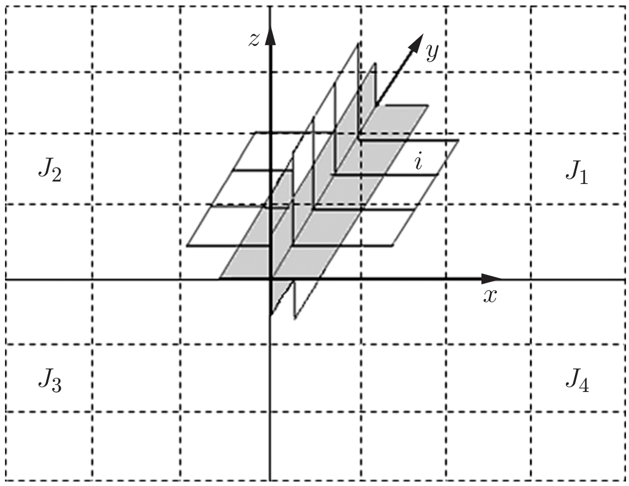

Рис. 4. Схема разбиения трещин на дислокационные элементы при $N = 4$

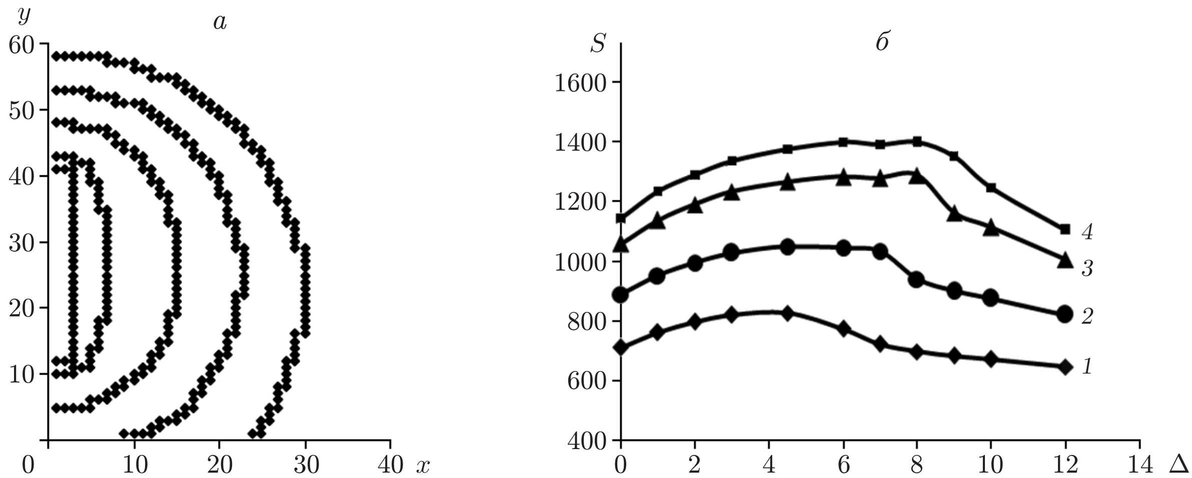

Рис. 5. Расчетная форма правой половины трещины ($N = 2$), образующейся при взрыве заряда длиной $l = 28$, расположенного в скважине с заглублением $\Delta = 12$ (*а*), и зависимость площади трещин от заглубления заряда Δ (*б*) при различных значениях средней величины раскрытия начальных трещин:
1 — $d_0 = 0{,}9$, *2* — $d_0 = 1{,}1$, *3* — $d_0 = 1{,}3$, *4* — $d_0 = 1{,}4$

число неизвестных при определении величины раскрытия элементов поверхностной трещины.

Решалась задача о развитии трещин при взрыве скважинного заряда, расположенного в скважине с заглублением относительно свободной поверхности, в случае $N = 2$. Начальная трещина располагалась вдоль оси y и считалась нагруженной пошагово увеличивающимся давлением, остальные элементы развивающейся трещины были свободны от нагружения. На рис. 5,*а* показаны в первом квадранте плоскости (x, y) формы радиальных трещин, образующихся при взрыве заряда длиной $L = 28$ с недозарядом $\Delta = 12$, при различных значениях величины раскрытия начальных трещин. Результаты расчетов размеров трещин и их площадей показывают, что существует заглубление, при котором площадь трещин максимальна. Это видно на рис. 5,*б*, где приведены зависимости площади трещины от заглубления при различных значениях величины раскрытия начальных трещин d_0. Сравнение величины оптимального заглубления с асимптотическим значением ширины трещины длинного заряда показывает, что оптимальное заглубление $\Delta_{opt} \approx 0{,}6L_m$.

Таким образом, разработаны расчетные схемы для определения формы и размеров радиальных трещин, образующихся при камуфлетном взрыве удлиненных зарядов в монолитном массиве породы и вблизи его поверхности.

Результаты проведенных расчетов позволяют сделать следующие выводы.

Отдельные трещины радиальной системы имеют в плане форму полуовала, поперечные и продольные размеры которого зависят от модельных параметров — размеров начальных трещин и величины их раскрытия, которые, в свою очередь, определяются длиной заряда, радиусом зоны дробления породы, образующейся при взрыве, радиальным смещением упругой среды на границе с раздробленной породой в момент остановки фронта дробления.

При увеличении длины заряда L поперечные размеры трещин стремятся к их асимптотическим значениям L_m, которые соответствуют бесконечно длинному заряду. При этом увеличение размера трещин в торцевом направлении заряда приблизительно равно $0{,}6L_m$. Выход поперечного размера трещин на асимптотическое значение происходит при $L \geqslant (6 \div 8)L_m$.

Заглубление удлиненного заряда, взрываемого вблизи свободной поверхности и обеспечивающего максимальную площадь трещины, близко к продольному размеру трещины камуфлетного заряда в торцевом направлении. Оптимальным является заглубление $\Delta_{opt} \approx 0{,}6L_m$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Григорян С. С.** Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // Прикл. математика и механика. 1967. Т. 31, вып. 4. С. 643–649.
2. **Родионов В. Н.** Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко, В. Н. Николаевский, А. Н. Ромашов, В. М. Цветков. М.: Недра, 1971.
3. **Чедвик П.** Механика глубинных подземных взрывов / П. Чедвик, А. Кокс, Г. Гопкинсон. М.: Мир, 1966.
4. **Шер Е. Н.** Учет динамики при описании разрушения хрупких сред взрывом шнурового заряда // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 3. С. 174–183.
5. **Александрова Н. И., Шер Е. Н.** Влияние дилатансии на разрушение горных пород взрывом цилиндрического заряда // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1999. № 4. С. 75–83.
6. **Crouch S. L.** Boundary element methods in solid mechanics / S. L. Crouch, A. M. Starfield. L.; Boston; Sydney: George Allen and Unwin, 1983.
7. **Михайлов А. М.** Расчет напряжений вокруг трещины // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2000. № 5. С. 36–42.
8. **Шер Е. Н., Михайлов А. М.** Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидроразрыве вблизи свободной поверхности // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2008. № 5. С. 53–61.
9. **Шер Е. Н., Михайлов А. М., Черников А. Г.** Оценка размеров зоны хрупкого разрушения при взрыве сосредоточенного заряда вблизи свободной поверхности // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2011. № 6. С. 35–42.
10. **Peach M., Koehler J. S.** The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them // Phys. Rev. 1950. V. 80, N 3. P. 436–439.

Поступила в редакцию 31/V 2017 г.