УДК 539.375 + 622.831

© 1992 г. Ю. Б. Назаренко

ФОРМИРОВАНИЕ ГЛУБИННЫХ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК ПРИ ИХ ПРОВЕДЕНИИ БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

Найдено распределение напряжений вокруг цилиндрической полости в массиве при импульсном приложении радиального давления на ее контуре. Это позволило установить формирование глубинных зон разрушения за счет радиальных растягивающих напряжений, образуемых после прохождения волны сжатия, и максимальное значение которых реализуется на некотором удалении от контура полости, а также выявить механизм многократного повторения процесса формирования глубинных зон разрушения, экспериментально обнаруженный в натурных условиях [1] и не нашедший пока объяснения с позиций статического проявления горного давления.

1. Возникновение волны сжатия при мгновенном приложении нагрузки на цилиндрическую полость в условиях плоской деформации. Будем искать решение уравнения движения для изотропного упругого массива

$$(\lambda + \mu)\mathrm{grad\ div}\ U + \mu\nabla^2 U = \rho \mathrm{U}^{\cdot\cdot} \tag{1.1}$$

(λ, μ — постоянные Ламе, ρ — плотность среды, U — вектор смещения), учитывая полярную симметрию, при помощи скалярного потенциала φ, связанного с перемещениями зависимостью Гельмгольца. При использовании этого потенциала уравнение (1.1) после преобразования Лапласа можно представить в виде

$$\partial^2\overline{\varphi}/\partial r^2 + r^{-1}\partial\overline{\varphi}/\partial r = \overline{\varphi}s^2/C_1^2 \tag{1.2}$$

Так: $\overline{\varphi}$ и s — изображение скалярного потенциала и времени в преобразовании Лапласа, r — полярный радиус, C_1 — скорость распространения продольной волны.

Учитывая, что решением уравнения (1.2) является функция вида

$$\overline{\varphi} = AK_0\,(sr/C_1)$$

и используя известные соотношения, связывающие перемещения и напряжения через потенциал [2], определим преобразованные по Лапласу радиальные перемещения, а также радиальные и тангенциальные напряжения

$$\overline{U} = -ASK_1\,(Sr),\quad \overline{\sigma}_r = A\,(2\mu + \lambda)S^2K_0\,(Sr) + A2\mu Sr^{-1}K_1\,(Sr),$$
$$\overline{\sigma}_\theta = -A2\mu Sr^{-1}K_1\,(Sr) + AS^2\lambda K_0\,(Sr),\quad S = s/C_1$$

Здесь K_0 и K_1 — функции Макдональда нулевого и первого порядка, A — постоянный коэффициент, определяемый из граничных условий.

Выполняя граничные условия на контуре полости a для мгновенно прикладываемого давления P_0 (при использовании функции Хевисайда) $\sigma_r = -P_0H\,(t)$, а также применяя асимптотические разложения функций Макдональда при условии $r^2S^2 \gg 1$, получим

$$\overline{U} = We^{-S(r-a)}\,(S + r^{-1})N^{-1}s^{-1},\quad \overline{\sigma}_r = -We^{-S(r-a)}\,[S\,(2\mu + \lambda) + 2\mu r^{-1}]N^{-1}Ss^{-1},$$
$$\overline{\sigma}_\theta = -We^{-S(r-a)}\,[\lambda S^2 - 2\mu\,(Sr^{-1} + r^{-2})]N^{-1}s^{-1},\quad W = P_0\sqrt{a/r},\quad N = S\,[S\,(2\mu + \lambda) + 2\mu/a] \tag{1.3}$$

Применяя обратное преобразование Лапласа к выражениям (1.3), получим решение

$$U = \frac{WM}{2\mu}\left(t - \frac{r-a}{C_1}\right),\quad \sigma_r = -W\left[1 - M\left(t - \frac{r-a}{C_1}\right)\frac{r-a}{ar}\right]$$
$$\sigma_\theta = -W\left[\frac{\lambda M}{2\mu C_1} - M\left(t - \frac{r-a}{C_1}\right)\left(\frac{1}{r} + \frac{\lambda M}{2\mu C_1 a}\right)\right],\quad M = \frac{2\mu C_1}{2\mu + \lambda} \tag{1.4}$$

определяющее распределение напряжений и перемещений в массиве в течение действия давления Δt на контуре полости.

2. Распределение напряжений в хвостовой части волны сжатия при прекращении действия давления на контуре полости. Рассмотрим теперь решение в случае прекращения действия давления на контуре полости через определенный отрезок времени Δt. Для этого приложим на контуре полости такое же давление, но с противоположным знаком. Тогда, суммируя решение (1.4) с новым решением, будем иметь

$$U = WM\Delta t/(2\mu), \quad \sigma_r = WM\Delta t\,(r - a)/(ar)$$
$$\sigma_\theta = WM\Delta t\,(r^{-1} + \lambda\,(2\mu + \lambda)^{-1}a^{-1}) \tag{2.1}$$

Как видно из (2.1), после прохождения волны сжатия в массиве возникают радиальные растягивающие напряжения, которые будут увеличиваться по мере удаления от контура выработки. Для установления их максимального значения рассмотрим другое решение, определяющее растягивающие напряжения в хвостовой части волны сжатия.

Растягивающие напряжения в приконтурной зоне массива после прохождения волны сжатия возникают за счет накопления в ней потенциальной энергии деформирования. После прохождения волны сжатия и снятия сил эти участки массива начнут возвратное движение. Указанный процесс можно описать при помощи следующей эквивалентной системы. Вырежем кольцевую зону массива, которая будет определять приконтурную зону после прохождения в ней волны сжатия, и для задания в ней таких же перемещений, как и в действительности, приложим к внутренней и внешней ее поверхности радиальные напряжения. При выполнении несложных операций получим значение внутреннего P_a и внешнего P_b давления на поверхности кольца

$$P_a = -Q\left(\frac{a^2 + b^2}{a} - 2b\sqrt{a/b}\right)$$
$$P_b = -Q\left(2a - \sqrt{\frac{a}{b}}\,\frac{a^2 + b^2}{b}\right); \quad Q = \frac{EP_0C_1\Delta t}{(2\mu + \lambda)(b^2 - a^2)} \tag{2.2}$$

Здесь E — модуль упругости горных пород, b и a — внешний и внутренний радиусы кольца.

Тогда, снимая напряжения на внутреннем контуре кольца, для чего мгновенно прикладываем к ней такое же давление другого знака, получим условия, полностью эквивалентные реальным процессам в приконтурной зоне массива.

Время, в течение которого на внутреннем контуре кольца будет приложена импульсная нагрузка, определим из условия равенства динамических и статических перемещений на внутреннем контуре

$$t = (2\mu + \lambda)\,(b^2 - a^2)\,[EC_1\,(a + b^2/a - 2b\sqrt{a/b})]^{-1} \tag{2.3}$$

Принимая во внимание, что внешний радиус кольца определяется выражением $b = a + tC_1$, и подставляя в него выражение (2.3), из решения полученного уравнения, раскладывая его в ряд Тейлора и пренебрегая членами более высоких порядков малости, получим

$$b = a\left[\sqrt{2 - \frac{4\nu^2}{1-\nu} + \frac{\nu^4}{(1-\nu)^2}} - 1 + \frac{\nu^2}{1-\nu}\right]^{-1} \tag{2.4}$$

а также значение максимального растягивающего напряжения на его внешней границе, которое определится из условия наложения статических и динамических напряжений (ν — коэффициент Пуассона)

$$\sigma_r = -Q\left[4a - \sqrt{\frac{a}{b}}\,(a^2 + b^2)\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)\right] \tag{2.5}$$

Значение параметра b, установленного из выражения (2.4), будет определять зону с максимальным значением растягивающего напряжения, так как она соответствует максимальному значению потенциальной энергии кольцевой зоны, на внешней границе которой только начинается возвратное движение, а на внутренней уже закончилось. Заметим также, что значение параметра b не должно превышать величину $3a$, соответствующую максимальным значениям радиальных растягивающих напряжений, определенных из выражения (2.1), а ограничение, налагаемое на асимптотическое решение, должно строго выполняться только на момент действия импульса давления. После его прекращения полученное решение довольно точно описывает распределение напряжений в волне сжатия (1.4), а также в хвостовой ее части (2.1) до момента достижения максимальных значений радиальных растягивающих напряжений в зоне, отстоящей на расстоянии $b - a$ от контура полости. Последнее подтверждается хорошей сходимостью результатов определения растягивающих напряжений по выражениям (2.1) и (2.5).

Таким образом, после прохождения волны сжатия в массиве возникают растягивающие напряжения, которые будут увеличиваться по мере удаления от контура выработки. Эти напряжения играют важную роль в формировании зон структурной дезынтеграции пород в связи с тем, что при прохождении волны сжатия горные породы находятся в состоянии всестороннего сжатия, а при учете статической концентрации напряжений от горного давления, близкого к объемному, и могут выдержать большие напряжения, не разрушаясь, тогда как возникающие растягивающие радиальные напряжения вызывают разрушение горных пород даже при весьма малых их значениях.

Возникновение в глубине массива на некотором удалении от контура выработки зон с интенсивными растягивающими напряжениями может привести к разрушению горных пород и образованию трещин, параллельных контуру выработки, т. е. к структурной дезинтеграции горных пород, что подтверждается данными экспериментальных исследований [1].

3. Механизм образования нескольких зон разрушения по глубине массива. Приконтурная зона массива после прохождения волны сжатия имеет остаточные радиальные смещения, т. е. обладает потенциальной энергией, которая и является источником возникновения растягивающих напряжений в начале движения кольцевой зоны в исходное состояние. Их возрастание по мере удаления от контура выработки связано с тем, что на большем удалении от контура выработки, но не превышающим $b - a$, внутренние кольцевые зоны, формирующие растягивающие напряжения, имеют более высокую потенциальную энергию.

Тогда очевидно, что после формирования на некотором удалении от контура выработки r_1 первой зоны разрушения произойдет разгрузка массива, т. е. растягивающие напряжения упадут до нуля, а потенциальная энергия израсходуется на разрушение горных пород. С этого момента начнется новое накопление потенциальной энергии и новое нарастание растягивающих напряжений. Характер распределения напряжений в массиве после формирования первой зоны разрушения определим при рассмотрении массива с новым контуром полости r_1, на поверхности которого будет действовать нагрузка

$$P = -W(1 - Mf(r_1, a)\tau)\sqrt{\frac{r}{r_1}}, \quad 0 \leqslant \tau \leqslant \Delta t, \quad f(r_1, r) = \frac{r_1 - r}{r_1 r} \tag{3.1}$$

Учитывая выражение (2.1), установим распределение напряжений в хвостовой части волны сжатия

$$\sigma_r = -W\left[Mf(r_1, r) - Mf(r_1, a)\int\limits_0^{\Delta t} Mf(r_1, r)\tau d\tau\right] = WMf(r_1, r)\,\Delta t\left(1 - Mf(r_1, a)\frac{\Delta t}{2}\right) \tag{3.2}$$

Установим распределение напряжений после образования второй зоны разрушения (при $r = r_2$), учитывая, что расстояние до первой зоны разрушения должно быть намного меньше $b - a$, так как если первая зона разрушения будет находиться в зоне максимальных растягивающих напряжений на удалении от контура $b - a$, то разрушение во второй и тем более в третьей зоне происходить не будет, и, представляя давление на контуре r_2 в упрощенном виде, пренебрегая членами более высоких порядков малости, будем иметь

$$P = -W\sqrt{\frac{r}{r_2}}\,[1 - Mf(r_1, a)\tau - Mf(r_2, r_1)\tau], \quad 0 \leqslant \tau \leqslant \Delta t \tag{3.3}$$

Аналогично определим распределение напряжений для третьей зоны

$$\sigma_r = -WMf(r_2, r)\,\Delta t\,[1 - Mf(r_1, a)\,\frac{\Delta t}{2} - Mf(r_2, r_1)\,\frac{\Delta t}{2} \tag{3.4}$$

4. Формирование зон структурной дезынтеграции горных пород вокруг выработок при их проведении буровзрывным способом. Рассмотрим следующий пример. Горная выработка круговой формы радиуса $a = 3$ м расположена в изотропном упругом массиве с коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}2$ и прочностью на растяжение $R = 1{,}7$ МПа, скорость распространения продольных волн в котором составляет $C_1 = 1000$ м/с.

При сооружении горной выработки и извлечении горной массы буровзрывным способом рассмотрим воздействие на массив только от одной серии взрыва оконтуривающих шпуров, которые создают давление на контуре выработки интенсивностью $P_0 = -50$ МПа, мгновенно прикладываемое и сохраняющееся в течение времени $\Delta t = 0{,}9$ мс.

Тогда, определяя растягивающие напряжения в массиве после прохождения волны сжатия, установим первую зону разрушения, где растягивающие напряжения превысят предел прочности пород на растяжение, которая составит $r_1 = 3{,}6$ м. Однако так как толщина приконтурного слоя первой зоны разрушения будет намного меньше $b - a$, то в дальнейшем будет образовываться вторая ($r_2 = 4{,}75$ м) и третья ($r_3 = 8$ м) зоны разрушения.

Таким образом, при создании на контуре полости мгновенно прикладываемого импульсного воздействия в массив распространяется волна сжатия, после прохождения которой возникают растягивающие напряжения. Они могут привести к образованию глубинных зон, где произойдет разрушение горных пород, обнаруженное экспериментально [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А., Тропп Э. А., Кузнецов Ю. С.* Зональная дезынтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Ч. 1. Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1986. № 3. С. 3—15.
2. *Новацкий В.* Динамика сооружений. М.: Гостехиздат, 1963. 376 с.

Москва

Поступила в редакцию 14.XI.1990