УДК 622.235

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАХ ГРУППЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ ДЛЯ СЕЙСМОПРОГНОЗА

Н. С. Ремез, докт. техн. наук, В. В. Бойко (млад.), асп. (Институт гидромеханики НАН Украины), Ю. С. Ященко, асп. (НТУУ «КПИ»)

Наведено результати чисельних розрахунків хвильової взаємодії групових вибухів циліндричних зарядів у гірничому масив, виявлено закономірності розподілу полів напружень за наявності та відсутності взаємодії між зарядами.

Ключові слова: вибух, моделювання, сейсмічна хвиля, хвильова взаємодія, циліндричний заряд.

Приведены результаты численных расчетов волнового взаимодействия групповых взрывов цилиндрических зарядов в горном массиве, установлены закономерности распределения полей напряжений при наличии и отсутствии взаимодействия между зарядами.

Ключевые слова: взрыв, моделирование, сейсмическая волна, волновое взаимодействие, цилиндрический заряд.

Results of numerical calculations of wave interaction between group explosions of cylindrical charges in rock massif are set out, conformities of pressure distribution are established at presence and absence of interaction between charges.

Key words: explosion, modeling, seismic wave, wave interaction, cylindrical charge.

При проведении взрывных работ на горных предприятиях вблизи различных защищаемых объектов (здания, сооружения, газо- и нефтепроводы и т.п.) возникает дилемма. С одной стороны, необходимо достигнуть эффективного разрушения горных пород массовыми взрывами на карьерах, с другой – обеспечить безопасность охраняемых объектов.

Теоретические исследования механизма разрушения горных пород при взрывах групповых и одиночных зарядов в большинстве случаев проведены для зарядов сферической симметрии [1–4]. При этом используются упрощенные представления о развитии волновых процессов в массиве: породный массив полагается идеально упругим, ударные волны отсутствуют. Теоретические решения получены в потенциальном приближении [5].

При исследовании взрывов группы цилиндрических зарядов удлиненный заряд заменяется цепочкой элементарных сосредоточенных зарядов [1–2, 6] или закономерности, полученные при решении одномерных задач, обобщаются для пространственных зависимостей [7]. В работах [8–9] поставлены и решены пространственные задачи о взрыве одного или двух цилиндрических зарядов в

грунтовом пространстве, однако результаты этих решений не в полной мере раскрывают механизм суперпозиции волн при групповых взрывах.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что теоретические исследования по изучению эффекта изменения зон разрушения вследствие суперпозиции волн от нескольких зарядов цилиндрической симметрии являются актуальными. Целью работы является теоретическое исследование механизма взаимодействия волн при взрыве группы зарядов цилиндрической симметрии в горной породе.

В данной работе проведено численное моделирование действия взрыва группы зарядов цилиндрической симметрии в горном массиве. При этом в развитии взрыва выделяются два этапа. На первом этапе рассматривается осесимметричное деформирование и разрушение горной породы под действием взрыва одиночного удлиненного заряда. Задача решается в связанной постановке, при этом полагается, что в горном массиве вдали от свободной поверхности расположен цилиндрический заряд взрывчатого вещества (ВВ) длиной l и радиусом r_0, который детонирует мгновенно. В результате мгновенного воздействия этого давления на контактную границу раздела продукты детонации–горная порода по массиву распространяется ударная волна, контактная граница расширяется, а к оси заряда движется сходящаяся волна. При этом по всему объему заряда устанавливается одинаково высокое давление P_n, а плотность продуктов детонации (ПД) ρ_n равна начальной плотности ВВ.

Продукты детонации и горная порода (ГП) изучаются в рамках механики сплошной среды, уравнения движения для цилиндрической симметрии имеют следующий вид [10]:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r}+\frac{\tau_{rz}}{r}=\rho\frac{du}{dt}, \qquad u=\frac{dz}{dt}; \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}+\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r}+\frac{\sigma_{zz}-\sigma_{\theta\theta}}{r}=\rho\frac{dw}{dt}\ , \quad w=\frac{dr}{dt}; \tag{2}$$

$$\frac{1}{V}\frac{dV}{dt}=\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial r}+\frac{w}{r}; \tag{3}$$

$$\sigma_{zz}=S_{zz}-P, \quad \sigma_{rr}=S_{rr}-P, \quad \sigma_{\theta\theta}=S_{\theta\theta}-P; \tag{4}$$

$$P=\frac{1}{3}\left(\sigma_{rr}+\sigma_{\theta\theta}+\sigma_{zz}\right); \quad V=\frac{\rho_0}{\rho}, \tag{5}$$

где z, r – координаты; t – время; $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}$ – нормальные напряжения; τ_{rz} – касательное напряжение; $S_{zz}, S_{rr}, S_{\theta\theta}$ – компоненты девиатора тензора напряжений; P – среднее гидростатическое давление; ρ – плотность; u, w – компоненты скорости; V – удельный объем.

Расширение продуктов детонации происходит согласно двучленной изоэнтропе [11]:

$$P=A\cdot\rho^{n}+B\rho^{\gamma+1}, \tag{6}$$

где A, B, n, γ – константы, которые характеризуют данный тип ВВ и определяются их детонационными характеристиками. Для продуктов детонации σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{zz} = \tau_{zr} = 0$.

Соотношения между напряжениями и деформациями горной породы записываются на основе дифференциальной теории пластичности. Величины компонентов тензора деформаций представляются в виде суммы упругих и пластических деформаций

$$\varepsilon_{rr} = \varepsilon'_{rr} + \varepsilon''_{rr}; \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon'_{zz} + \varepsilon''_{zz}; \quad \varepsilon_{rz} = \varepsilon'_{rz} + \varepsilon''_{rz}. \tag{7}$$

Связь между напряжениями и упругими деформациями устанавливается согласно формулам обобщенного закона Гука для изотропного материала

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon'_{rr} + \nu\varepsilon'_{zz}); \quad \sigma_{zz} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon'_{zz} + \nu\varepsilon'_{rr}); \quad \sigma_{rz} = G\varepsilon'_{rz}, \tag{8}$$

где E, G, ν – физико-механические характеристики горной породы.

В случае пластических деформаций соотношения между соответствующими деформациями и напряжениями записываются в виде

$$d\varepsilon''_{rr} = \lambda S_{rr}; \quad d\varepsilon''_{zz} = \lambda S_{zz}; \quad d\varepsilon''_{rz} = \lambda S_{rz} \tag{9}$$

с использованием энергетического условия прочности

$$S_{rr}^2 + S_{zz}^2 + 2S_{rz}^2 \le \frac{2}{3}\sigma_T^2, \tag{10}$$

где λ – скалярный коэффициент, который определяется в процессе решения задачи, σ_T – предел прочности.

Начальными условиями задачи являются следующие:

$$u = 0, w = 0, P = P_n, \rho = \rho_n \quad \text{при} \quad z < l, r < r_0, \tag{11}$$

$$u = 0, w = 0, P = P_0, \rho = \rho_0 \quad \text{при} \quad z > l, r > r_0. \tag{12}$$

Граничные условия задачи:

$$u_{\text{ПД}} = u_{\text{гр}}, P_{\text{ПД}} = P_{\text{гр}}, \rho_{\text{ПД}} \ne \rho_{\text{гр}} \quad \text{при} \quad z = l, \tag{13}$$

$$w_{\text{ПД}} = w_{\text{гр}}, P_{\text{ПД}} = P_{\text{гр}}, \rho_{\text{ПД}} \ne \rho_{\text{гр}} \quad \text{при} \quad r = r_0. \tag{14}$$

Здесь индексы «ПД» и «гр» означают «продукты детонации» и «грунт» соответственно.

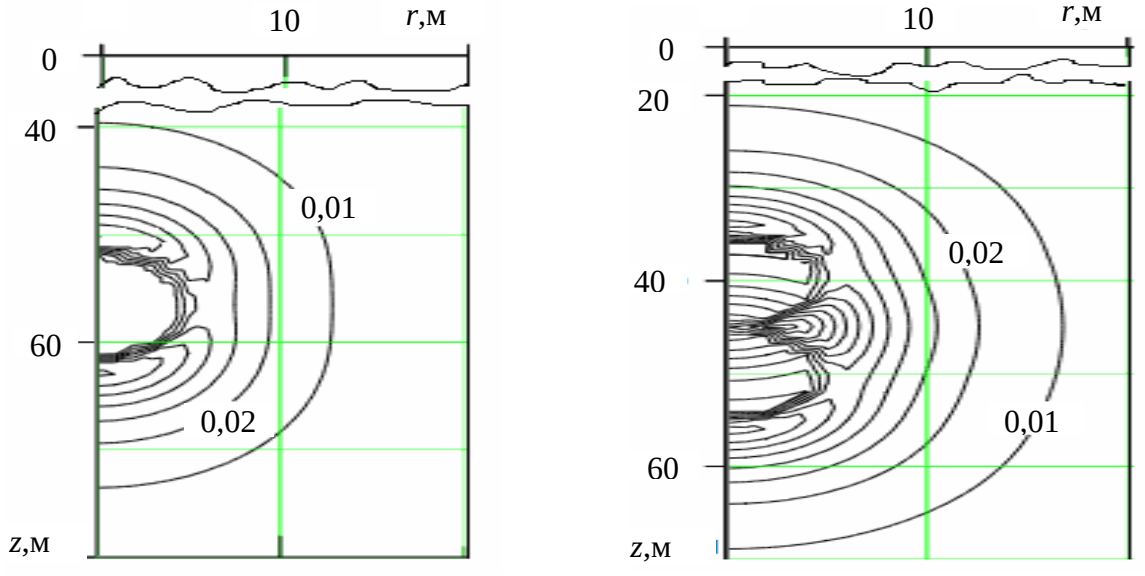
Для аппроксимации системы дифференциальных уравнений (1)–(14) применялся метод конечных разностей с использованием конечно-разностной схемы типа «крест» второго порядка точности по пространственной и временной координатам.

Зависимости параметров взрывных волн (напряжения, скорости, время начала, продолжительность и время окончания действия импульса в данной точке грунта) от времени, полученные в результате численного решения,

использовались на втором этапе решения задачи. Далее, основываясь на принципе суперпозиции взрывных волн от отдельных зарядов при групповых взрывах, были рассчитаны поля напряжений и скоростей. Исследовался взрыв одного цилиндрического заряда и двух зарядов, расположенных на расстояниях, равных $10r_0$, $20r_0$, $30r_0$. При этом полагалось, что масса двух зарядов равняется массе одиночного заряда. В качестве примера рассматривался известняк с такими физико-механическими характеристиками: $\rho = 2500$ ^{3}, $E = 3{,}4 \cdot 10^{10}$, $\nu = 0{,}25$, $G = 1{,}36 \cdot 10^8$, $G_T = 0{,}5 \cdot 10^8$. В качестве ВВ был выбран литой тротил.

На рис. 1 представлены изобары напряжений σ_{rr} (в ГПа) в плоскости *rOz* в момент времени t = 0,005 с при взрывах одного заряда (*а*), двух зарядов при расстоянии между ними $a = 10r_0$ (*б*), двух зарядов при $a = 20r_0$ (*в*) и двух зарядов при расстоянии $a = 30r_0$ (*г*). Из анализа рисунка следует, что наименьший объем зоны разрушения получается при взрыве одиночного заряда. С увеличением расстояния между зарядами увеличивается объем зоны разрушения. Однако, начиная с расстояния $a = 30r_0$, происходит нарушение принципа суперпозиции, наблюдается наличие зоны (нн), где не соблюдается критерий разрушения и горная порода остается нераздробленной (рис. 1, *г*), что в полной мере подтверждают экспериментальные данные [12].

На рис. 2 показаны изобары напряжений σ_{rr} при взрывах одного заряда (*а*) и двух зарядов при расстоянии между ними, равном $a = 30r_0$ в момент времени t = 1,0 с. Из рисунка следует, что волна напряжения в данный момент времени на расстояниях $r = 250r_0$, $z = 420r_0$ становится упругой волной, а поля напряжений имеют явно выраженную эллиптическую форму, что ранее было установлено экспериментально [13]. Интересным результатом является установление того факта, что при расстоянии между зарядами, равном $30r_0$, когда взаимодействие отсутствует, происходит удвоение упругих напряжений, что приводит к увеличению параметров сейсмовзрывных волн на окружающую среду.



а *б*

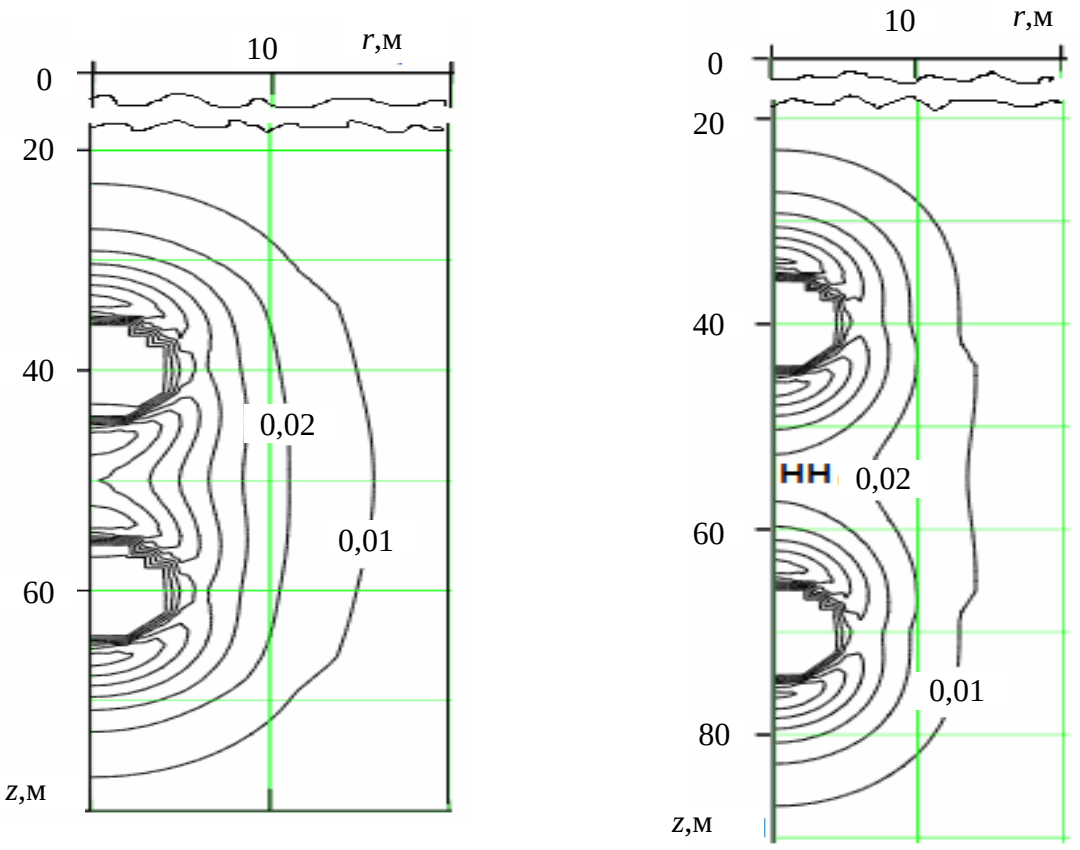


Рис. 1. Изобары напряжений σ_{rr} (в ГПа) в плоскости *rOz* в момент времени t = 0,005 с при взрывах: одного заряда (*а*), двух зарядов при $a = 10r_0$ (*б*), двух зарядов при $a = 20r_0$ (*в*), двух зарядов при $a = 30r_0$ (*г*)

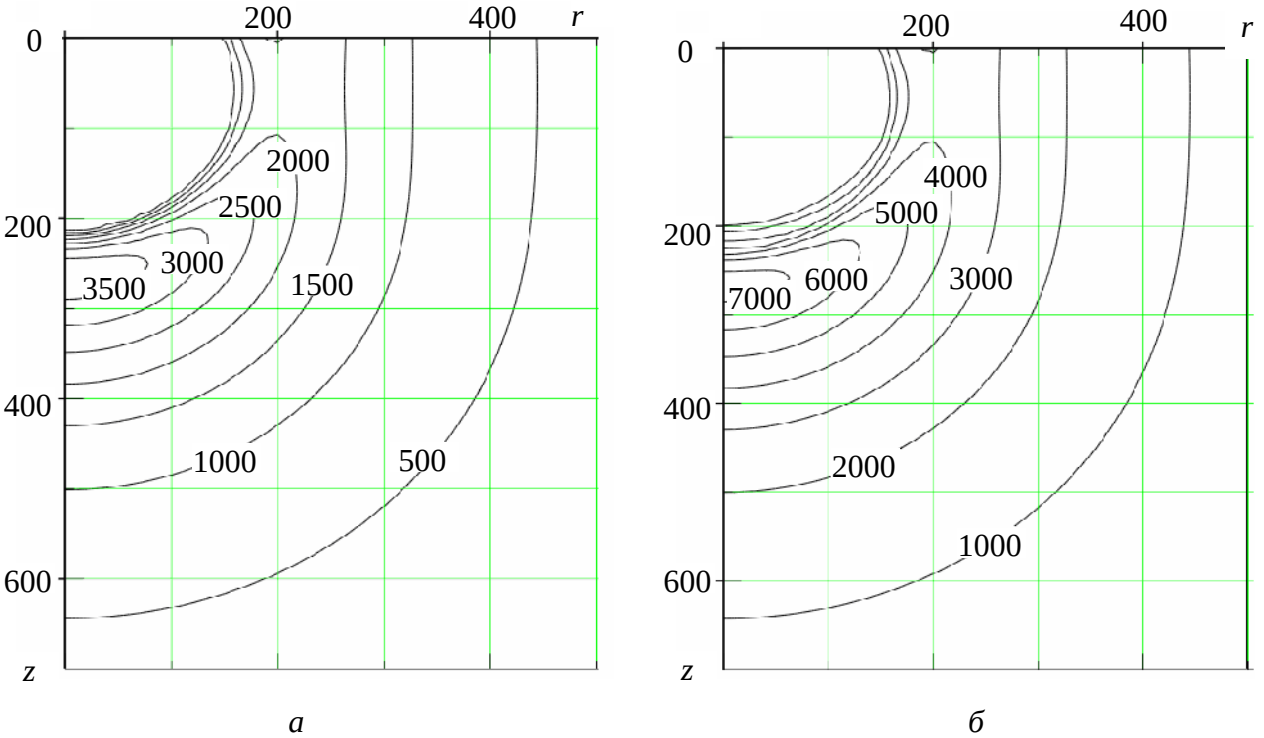


Рис. 2. Изобары напряжений σ_{rr} (в Па) в плоскости *rOz* в момент времени t = 1,0 с при взрывах: *а* – одного заряда, *б* – двух зарядов при $a = 30r_0$

Выводы

Разработаны математическая модель, алгоритм и программа для численного решения задачи о волновом взаимодействии групповых взрывов цилиндрических зарядов, на основании которого впервые установлены: граница перехода волны разрушения в упругую сейсмическую волну; механизм суперпозиции волн при взрывах групповых зарядов в случаях наличия или отсутствия взаимодействия между ними; подтверждена эллиптическая форма распределения полей напряжения с большой осью вдоль ряда и с малой – поперек.

Направлением дальнейших исследований является изучение взаимодействия волновых полей при взрывах цилиндрических групповых зарядов при наличии свободной поверхности.

Результаты данной работы могут быть использованы при проведении подземных взрывных работ вблизи охраняемых объектов для расчета рациональных параметров взрыва, которые позволяют получить оптимальную зону разрушения с минимальным сейсмическим эффектом взрыва.

1. *Шемякин Е. И.* О волнах напряжений в прочных горных породах / Е. И. Шемякин // ПМТФ. – 1963. – № 3. – С. 83–93.

2. *Боровиков В. А.* К расчету параметров волны напряжения при взрыве удлиненного заряда в горных породах / В. А. Боровиков, И. В. Ванягин // Взрыв. дело. – № 76/33. – М.: Недра, 1976. – С. 74–85.

3. *Кравец В. Г.* Динамика уплотнения грунтового массива взрывом / В. Г. Кравец. – К.: Наук. думка, 1979. – 134 с.

4. *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. – 200 с.

5. *Михалюк А. В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках / А. В. Михалюк. – К.: Наук. думка, 1980. – 154 с.

6. *Баженов В. Г.* Деформирование цилиндрической оболочки в мягкой грунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения / В. Г. Баженов, А. В. Кочетков, В. Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. – Горький: Горьковский университет, 1989. – С. 87–95.

7. Основы теории и методы взрывного дробления горных пород / Под ред. В. М. Комира. – К.: Наук. думка, 1979. – 224.

8. *Фролов О. О.* Особливості розрахунку об’єму руйнування скельних порід під час вибуху свердловинного заряду з урахуванням хвиль напружень / О. О. Фролов // Вісник НТТУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2006. – Вип. 14. – С. 93–101.

9. *Фролов О. О.* Теоретичні передумови розрахунку об’єму руйнування гірських порід під час вибуху систем подовжених зарядів / О. О. Фролов //

Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2008. – Вип. 16. – С. 13–16.

10. *Баум Ф. А.* Физика взрыва / [Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др.] – М.: Наука, 1975. – 704 с.

11. *Каширский А. В.* Влияние уравнения состояния на разлет продуктов детонации /А. В. Каширский, Л. П. Орленко, В. Н. Охитин // Прикл. мех. и техн. физика. – 1973. – № 2. – С. 71–74.

12. *Кравець В. Г.* Підривні роботи на кар’єрах: Навч. посібник / В. Г. Кравець, В. Д. Воробйов, А. О. Кузьменко. – К.: ІСДО, 1994. – 376 с.

13. *Бойко В. В.* Методи побудови та управління межами сейсмобезпечних зон при підривних роботах на кар’єрах України / В. В. Бойко // Проблеми охорони праці в Україні: Зб. наук. праць. – К: ННДІОП. – 2001. – Вип. 4. – С. 17–24.