

УДК 622.257 + 658.3.018

*д.т.н. Чернай А.В.
(НГУ, Днепропетровск),
к.т.н. Налісько Н.Н., Лукашенко Е.Н.
(Горный факультет УИПА, г. Стаханов, Украина)*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ВВ ВБЛИЗИ ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Наведено результати чисельного моделювання дії заряду ВР поблизу поверхні масиву порід. За результатами рішення тестових завдань встановлена можливість проведення чисельного експерименту.

***Ключові слова:** метод великих часток, рівняння стану, масив гірських порід, ударна хвиля, швидкість поширення.*

Приведены результаты численного моделирования действия заряда ВВ вблизи поверхности массива пород. По результатам решения тестовых задач установлена возможность проведения численного эксперимента.

***Ключевые слова:** метод крупных частиц, уравнение состояния, массив горных пород, ударная волна, скорость распространения.*

Горная наука в своем развитии постоянно опирается на достижения фундаментальных наук: физики, химии, теории упругости, сопротивления материалов и др. Решению прикладных задач горного дела во многом оказывал содействие физико-математические науки и частности математическое моделирование производственных процессов.

В настоящее время в угольной промышленности достаточно широко используются накладные и открытые заряды взрывчатых веществ (ВВ). Детальное исследование процессов разрушения и взрыва в этих условиях вызывают практический интерес для повышения эффективности и безопасности работ.

В выполненных ранее исследованиях взрывного разрушения массивов пород были установлены наиболее общие законы геомеханики взрыва внутренних зарядов [1], а также найдены решения по моделированию результатов взрыва в определенных горно-геологических условиях [2, 3, 4]. Моделирование действия накладных и открытых зарядов проводилось в основном на натуральных или физических моделях.

Наиболее перспективным в теоретическом исследовании является численное моделирование быстропротекающих процессов. На горном

факультете УИПА совместно с НГУ для этих целей был использован модифицированный метод крупных частиц (метод Давыдова) [3, 5]. Эффективность метода граничит с проведением численного эксперимента.

Постановка задачи для расчета действия открытого заряда следующая. Необходимо рассчитать параметры ударной волны и поля напряжений в массиве от действия открытого заряда вблизи поверхности массива скальных пород (рисунок 1).

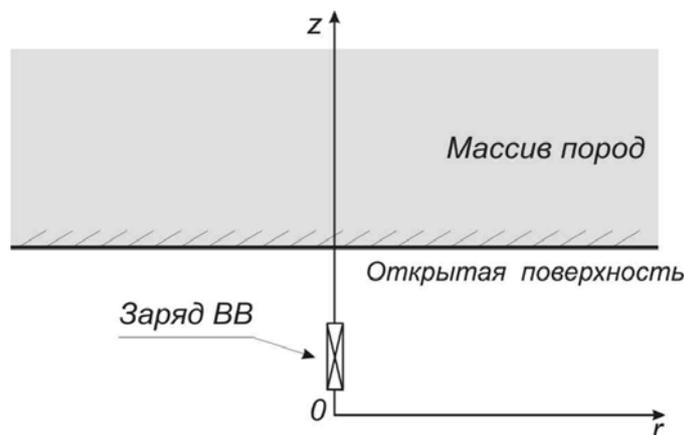


Рисунок 1 – Схема задачи

Согласно этого метода движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) &= 0, && \text{неразрывности;} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{движения;}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(PW) = 0, \quad \text{энергии;}$$

где ρ – плотность; P – давление; W – скорость; u, v – компоненты скорости W по оси z и r соответственно; z, r – цилиндрические координаты; $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ – полная энергия; J – внутренняя энергия.

Для замыкания этой системы используются уравнения состояния. Рассматриваемая задача предполагает учет в расчётной области четырёх веществ: газов - продуктов детонации (ПД) ВВ; массива горных пород, и атмосферного воздуха.

В качестве уравнения состояния продуктов детонации воспользуемся УРС для ТНТ [6], которое представим в виде двухзвенной кривой:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{P_*} &= \left(\frac{\rho}{\rho_*} \right)^n, \text{ при } P \leq P_*, \quad \rho \leq \rho_*, \quad n = 1,3, \\ \frac{P}{P_n} &= \left(\frac{\rho}{\rho_n} \right)^n, \text{ при } P_* < P \leq P_n, \quad \rho_* < \rho \leq \rho_n, \quad n = 3, \end{aligned} \right\}$$

где P_n, ρ_n, P_*, ρ_* – давление и плотность в точках Чемпена–Жуге и в точке кривой разгрузки.

В качестве УРС атмосферного воздуха воспользуются уравнения состояния идеального газа [7]:

$$P = (\gamma - 1)\rho \cdot j,$$

где j – внутренняя энергия воздуха; γ – показатель политропы; ρ – плотность.

Наиболее адекватным УРС для массива является обобщенное уравнение (массив-дробленая порода), предложенное в работе [8], которое получено на основе упруго-пластической модели С.С.Григоряна [9]. Особенностью этого уравнения является то, что оно единым образом описывает поведение дробленой и сплошной части массива горной породы.

Обобщённое уравнение состояния имеет вид:

$$P = P_x(\rho) - \rho\Gamma(E - E_x(\rho)); \quad E_x(\rho) = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{P_x(\rho)}{\rho^2} d\rho,$$

где $P_x(\rho) = \frac{k}{n} \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right)$. Здесь k и n – константы, $k = 36$ ГПа, $n =$

3; Γ – коэффициент Грюнайзена, $\Gamma = 1$; $y = \frac{\rho}{\rho_0}$, где ρ_0, ρ – соответственно, начальная и текущая плотность массива.

В статье представлены результаты моделирования тестовой задачи по схеме на рисунке 1. Геометрические размеры расчетной области следующие. Заряд находится на расстоянии 0,1 м от массива (до торца). Длина заряда 0,1 м, диаметр 0,04 м. Характеристики среды: давление детонации $P_{детон.} = 1,2$ ГПа, удельная энергия заряда $E = 5,45$ МДж/кг, плотность ВВ $\rho = 1100$ кг/м³, масса – 0,25 кг плотность воздуха $\rho = 1,0$ кг/м³. Численное моделирование тестовой задачи проводилось для массива пород с коэффициентом крепости по шкале проф. Протодяконова $f > 12$, что соответствует породам с большой акустической жесткостью. Прочностные свойства породы учтены следующими характери-

стиками: предел прочности на одноосное сжатие $[\sigma_{сж}]$, растяжение $[\sigma_p]$, сдвиг $[\tau_s]$, сцепление $[Y_0]$, коэффициент внутреннего трения $\mu_{тр}$, коэффициент Пуассона μ , Модуль Юнга E , плотность ρ (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристика породного массива

Обозначение	Единицы	Величина	Обозначение	Единицы	Величина
$[\sigma_{сж}]$	ГПа	18	$[Y_0]$	ГПа	0,2
$[\sigma_p]$	ГПа	0,18	μ	–	0,35
$[\tau_s]$	ГПа	1,8	E	ГПа	50
$\mu_{тр}$	–	0,4	ρ	кг/м ³	2500

Тестовая задача сводилась к определению скорости ударной волны в воздухе от взрыва заряда и некоторых других характеристик процесса распространения ударной волны и сравнения их с известными экспериментальными данными. Детонация заряда считается мгновенной. Плотность воздуха варьировалась от 0,25 до 10 кг/м³. Для проведения численного эксперимента разработана компьютерная программа для визуализации процесса распространения ударной волны в среде.

В результате численного эксперимента были получены следующие результаты (рисунок 2). При плотности воздуха $\rho = 1$ кг/м³ скорость ударной волны составила $V_{уд} = 2000$ м/с (рисунок 2, график а), что соответствует известным экспериментальным данным. Скорость ударной волны определена по времени прихода ударной волны к массиву (50 мс) и пройденному пути 0,1 м:

$$v_{уд} = \frac{l}{t} = \frac{1 \cdot 10^{-1}}{50 \cdot 10^{-6}} = 2000 \text{ м/с} .$$

Для детального тестирования модели плотность воздуха задавалась выше и ниже реального значения: 10 кг/м³ (рисунок 2, график б) и 0,25 кг/м³ (рисунок 2, график в). В обоих случаях отмечалось адекватное реагирование модели, а именно, в первом случае скорость ударной волны снизилась до 1200 м/с, фронт ударной волны формировался лишь на 30 мс. Во втором случае скорость ударной волны возрастала до 3000 м/с, при этом ударная волна на фронте распространения продуктов детонации была слабо выражена. Более четко обозначилось формирование ударной волны внутри газового облака продуктов детонации, где плотность газов значительно выше плотности воздуха. Здесь ударная волна сформировалась за счет «подпираания» внутреннего газового ядра с большей энергией, периферических газов облака продуктов детонации.

Выводы

Полученный алгоритм численного счета модифицированным методом «крупных» частиц можно использовать для нахождения закономерностей действия открытого заряда вблизи открытой поверхности в необходимых условиях ведения взрывных работ.

Библиографический список

1. Литвинский Г.Г. *К основам теории геомеханики подземного взрыва // Проблемы горного дела и экологии: сб. науч. тр. - Донецк: Вебер, 2007.*

2. Ефремов Э.И. *Прогнозирование дробления горных массивов взрывом / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, А.И. Пастухов. – К.: Наукова думка, 1990. – 120 с.*

3. Чернай А.В. *О перспективе использования численного метода расчета - „метод крупных частиц” в задачах динамического воздействия на горный массив / А.В. Чернай, В.В. Соболев, Н.Н. Налысько // Сб. научн. трудов Национальной горной академии Украины. №11, т.3. - Днепропетровск: НГАУ, 2001.- С.225-232.*

4. Жуков В.В. *Динамическое деформирование и разрушение массива горных пород // В.В. Жуков, В.Ф. Котенко, Ю.Г. Коротких. – Л.: Наука, 1979.– 165 с.*

5. Белоцерковский О.М. *Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982.– 391 с.*

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

7. Гурин А.А. *Ударные воздушные волны в горных выработках /А.А. Гурин, П.С. Малый, С.К. Савенко. – М.: Недра, 1983.– 223 с.*

8. Вовк А.А. *Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А.А.Вовк. – К.: Наукова думка, 1984.– 287 с.*

9. Григорян С.С. *Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород / Григорян С.С. // Прикладная математика и механика. – 1967. – № 4(31). – С. 643 – 669.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.