

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

У даній статті розглянутий варіант кінцево-різницевого методу моделювання процесу поширення сейсмічних коливань стосовно до задач шахтної сейсморозвідки.

USING OF FINITE-DIFFERENCE METHODS IN TASKS OF MINING SEISMIC EXPLORATION

Version of finite-difference method for modeling of seismic waves propagation process is considered in the context of mine seismic exploration

Шахтная сейсморазведка с первых лет своего существования опиралась на методы математического моделирования, позволяющие проводить теоретический анализ процесса распространения сейсмических колебаний в угленосной толще, выявлять информативные характеристики волновых пакетов различной природы, разрабатывать критерии прогноза нарушений различных типов [1]. В последние годы распространение получили конечно-разностные методы решения основных уравнений, описывающих данный процесс (МКР). Они достаточно хорошо апробированы на практике и используются как при решении задач как наземной, так и шахтной сейсморазведки [1-5].

Применение математического моделирования может быть полезно по двум направлениям. Первое – фундаментальные исследования, направленные на анализ общих закономерностей распространения сейсмических колебаний в угленосной толще. Второе – конкретные исследования в рамках существующих методик проведения практических прогнозных экспериментов, предусматривающие предварительный анализ ожидаемых характеристик волнового поля для выбора оптимальной схемы размещения системы наблюдений для качественной оценки наиболее информативных параметров волновых пакетов. В первом случае используются, как правило, обобщенные модели, характерные для типичных горно-геологических условий залегания угольных пластов того или иного угольного бассейна. Во втором случае – конкретные модели, построенные по данным шахтных геологических служб. Некоторые методики использования МКР представляют собой итерационный процесс постепенного уточнения параметров волнового поля на основе построения все более адекватных моделей [5]. При этом очевиден факт, что размеры модельной решетки пропорциональны базе реальных наблюдений и подробности описания среды. Чрезвычайно актуальна задача оптимизации модели таким образом, чтобы повысить быстродействие расчета без потери точности решения.

Рассмотрим один из путей решения данной проблемы. Для задач шахтной пластовой сейсморазведки характерна следующая особенность моделей. Если вдоль плоскости напластования изменения физических параметров сред практически нет (за исключением зон геологических нарушений), то поперек плоскости напластования изменение может носить существенный характер. Этот

факт должен быть отражен в способе построения счетной решетки. Она будет неоднородной, с различными интервалами между узлами по осям X и Z . При этом можно добиться существенного сокращения количества узлов (а значит уменьшить время расчета) практически без потери точности решения. Далее выведем математические соотношения, реализующие данный подход.

Распространение сейсмоакустических колебаний в угленосной толще описывается следующим уравнением [6]:

$$(\lambda + \mu)grad\ div \vec{w} + \mu \Delta \vec{w} = \rho \ddot{\vec{w}}, \quad (1)$$

где ρ - плотность, \vec{w} - вектор перемещений, λ, μ - коэффициенты Ламе. Оно носит название уравнения Ламе и является уравнением движения, записанным для твердого тела в случае малых деформаций, удовлетворяющих закону Гука.

Обозначим через u, v, w компоненты вектора перемещений \vec{w} (x, y и z соответственно), которые можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} u &= Ue^{-\alpha_x t} \\ v &= Ve^{-\alpha_y t} \\ w &= We^{-\alpha_z t} \end{aligned}$$

Экспоненциальные части представляют собой особый вид затухания, которое существенно отличается от реального, поскольку не зависит ни от частоты (что противоречит теории), ни от каких-либо иных факторов. Оно вводится исключительно для погашения колебаний в граничной области модельной решетки при использовании метода конечных разностей [2].

Рассмотрим двухмерную модель углевмещающей среды, применяемую для проведения расчетов. Моделируемая область представляется неравномерной решеткой размерностью M на N элементов (по осям x и z соответственно) размером $\Delta x_{m,n} \times \Delta z_{m,n}$ каждый ($m=1..M, n=1..N$). Величины $\Delta x_{m,n}$ и $\Delta z_{m,n}$ представляют собой шаги дискретизации модельной решетки в пространстве, Δt – во времени (номера шагов $p=1..P$). Далее используем следующую систему обозначений:

$$\begin{aligned} K_{m,n}^y &= \frac{D_{y\ m,n}^+}{D_{y\ m,n}^-}, \quad K_{m,n}^x = \frac{D_{x\ m,n}^+}{D_{x\ m,n}^-}, \quad K_{m,n}^z = \frac{D_{z\ m,n}^+}{D_{z\ m,n}^-}, \\ N_{m+0.5,n}^{xy} &= \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m+1,n})}{(D_{y\ m,n}^- + D_{y\ m+1,n}^-)}, & N_{m-0.5,n}^{xy} &= \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m-1,n})}{(D_{y\ m,n}^- + D_{y\ m-1,n}^-)}, \\ N_{m,n+0.5}^{zy} &= \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m,n+1})}{(D_{y\ m,n}^- + D_{y\ m,n+1}^-)}, & N_{m,n-0.5}^{zy} &= \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m,n-1})}{(D_{y\ m,n}^- + D_{y\ m,n-1}^-)}, \\ N_{m+0.5,n}^{xy} &= \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m+1,n})}{(D_{y\ m,n}^- + D_{y\ m+1,n}^-)}, & N_{m-0.5,n}^{xy} &= \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m-1,n})}{(D_{y\ m,n}^- + D_{y\ m-1,n}^-)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{m,n+0.5}^{zx} &= \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m,n+1})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m,n+1}^-)}, & N_{m,n-0.5}^{zx} &= \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \frac{(C_{m,n} + C_{m,n-1})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m,n-1}^-)}, \\
M_{m+0.5,n}^x &= \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \frac{(F_{m,n} + F_{m+1,n})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m+1,n}^-)}, & M_{m-0.5,n}^x &= \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \frac{(F_{m,n} + F_{m-1,n})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m-1,n}^-)}, \\
M_{m,n+0.5}^z &= \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \frac{(F_{m,n} + F_{m,n+1})}{(D_{z\ m,n}^- + D_{z\ m,n+1}^-)}, & M_{m,n-0.5}^z &= \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \frac{(F_{m,n} + F_{m,n-1})}{(D_{z\ m,n}^- + D_{z\ m,n-1}^-)}, \\
A_{m,n}^x &= \frac{1}{D_{x\ m,n}^-} \left(\frac{2}{\Delta t^2} - \sigma_{x\ m,n}^2 - 2F_{m,n} \frac{1}{\Delta x^2} - 2C_{m,n} \frac{1}{\Delta z^2} \right), \\
A_{m,n}^z &= \frac{1}{D_{z\ m,n}^-} \left(\frac{2}{\Delta t^2} - \sigma_{z\ m,n}^2 - 2A_{m,n} \frac{1}{\Delta x^2} - 2C_{m,n} \frac{1}{\Delta z^2} \right), \\
A_{m,n}^y &= \frac{1}{D_{y\ m,n}^-} \left(\frac{2}{\Delta t^2} - \sigma_{y\ m,n}^2 - 2C_{m,n} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right) \\
L_{m+0.5,n+0.5}^z &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m+1,n+1})}{(D_{z\ m,n}^- + D_{z\ m+1,n+1}^-)}, \\
L_{m-0.5,n+0.5}^z &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m-1,n+1})}{(D_{z\ m,n}^- + D_{z\ m-1,n+1}^-)}, \\
L_{m-0.5,n-0.5}^z &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m-1,n-1})}{(D_{z\ m,n}^- + D_{z\ m-1,n-1}^-)}, \\
L_{m+0.5,n-0.5}^z &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m+1,n-1})}{(D_{z\ m,n}^- + D_{z\ m+1,n-1}^-)}, \\
L_{m+0.5,n+0.5}^x &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m+1,n+1})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m+1,n+1}^-)}, \\
L_{m-0.5,n+0.5}^x &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m-1,n+1})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m-1,n+1}^-)}, \\
L_{m-0.5,n-0.5}^x &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m-1,n-1})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m-1,n-1}^-)}, \\
L_{m+0.5,n-0.5}^x &= \frac{1}{4\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} \frac{(B_{m,n} + B_{m+1,n-1})}{(D_{x\ m,n}^- + D_{x\ m+1,n-1}^-)}, \\
D_{x\ m,n}^+ &= -\left(\frac{1}{\Delta t^2} + \frac{\sigma_{x\ m,n}}{\Delta t} \right), & D_{x\ m,n}^- &= \left(\frac{1}{\Delta t^2} - \frac{\sigma_{x\ m,n}}{\Delta t} \right), \\
D_{z\ m,n}^+ &= -\left(\frac{1}{\Delta t^2} + \frac{\sigma_{z\ m,n}}{\Delta t} \right), & D_{z\ m,n}^- &= \left(\frac{1}{\Delta t^2} - \frac{\sigma_{z\ m,n}}{\Delta t} \right), \\
D_{y\ m,n}^+ &= -\left(\frac{1}{\Delta t^2} + \frac{\sigma_{y\ m,n}}{\Delta t} \right), & D_{y\ m,n}^- &= \left(\frac{1}{\Delta t^2} - \frac{\sigma_{y\ m,n}}{\Delta t} \right), \\
F_{m,n} &= \frac{(\lambda_{m,n} + 2\mu_{m,n})}{\rho_{m,n}},
\end{aligned}$$

$$B_{m,n} = \frac{(\lambda_{m,n} + \mu_{m,n})}{\rho_{m,n}},$$

$$C_{m,n} = \frac{\mu_{m,n}}{\rho_{m,n}}.$$

Используя эти соотношения, уравнение (1) можно записать в конечно-разностном представлении:

$$\begin{aligned}
V_{m,n}^{p+1} &= K_{m,n}^y V_{m,n}^{p-1} + A_{m,n}^y V_{m,n}^p + N_{m+0.5,n}^{xy} V_{m+1,n}^p + N_{m-0.5,n}^{xy} V_{m-1,n}^p + \\
&\quad + N_{m,n+0.5}^{zy} V_{m,n+1}^p + N_{m,n-0.5}^{zy} V_{m,n-1}^p, \\
U_{m,n}^{p+1} &= K_{m,n}^x U_{m,n}^{p-1} + A_{m,n}^x U_{m,n}^p + M_{m+0.5,n}^x U_{m+1,n}^p + M_{m-0.5,n}^x U_{m-1,n}^p + \\
&\quad + N_{m,n+0.5}^{zx} U_{m,n+1}^p + N_{m,n-0.5}^{zx} U_{m,n-1}^p + \\
L_{m+0.5,n+0.5}^x W_{m+1,n+1}^p - L_{m-0.5,n+0.5}^x W_{m-1,n+1}^p - L_{m+0.5,n-0.5}^x W_{m+1,n-1}^p + L_{m-0.5,n-0.5}^x W_{m-1,n-1}^p \\
W_{m,n}^{p+1} &= K_{m,n}^z W_{m,n}^{p-1} + A_{m,n}^z W_{m,n}^p + M_{m,n+0.5}^z W_{m,n+1}^p + M_{m,n-0.5}^z W_{m,n-1}^p + \\
&\quad + N_{m+0.5,n}^{xz} W_{m+1,n}^p + N_{m-0.5,n}^{xz} W_{m-1,n}^p + \\
L_{m+0.5,n+0.5}^z U_{m+1,n+1}^p - L_{m-0.5,n+0.5}^z U_{m-1,n+1}^p - L_{m+0.5,n-0.5}^z U_{m+1,n-1}^p + L_{m-0.5,n-0.5}^z U_{m-1,n-1}^p
\end{aligned} \tag{2}$$

Условия устойчивости решения имеют вид:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\min \{ \Delta x_{m,n}, \Delta z_{m,n} \}}{V_{S_{m,n}} \sqrt{2}} \right\}$$

где $V_{S_{m,n}}$ - скорость распространения сдвиговых волн для узла модели с “координатами” (m,n) .

Основанный на изложенном выше подходе алгоритм моделирования процесса распространения сейсмических колебаний в угленосной толще с учетом реального расположения геологических и техногенных объектов в настоящее время при непосредственном участии автора реализован в УкрНИМИ в соответствующем комплекте программ. Для ряда моделей он позволяет сократить время расчета в 4-5 раз без потери точности решения.

Для примера на рис. 1 показаны теоретические сейсмограммы Y компоненты волнового поля, рассчитанные для реальных горно-геологических условий залегания угольного пласта g_2 (ГО АО «Шахта «Коммунист», 9-й северный конвейерных ходок в целиковой части шахтного поля). Угольный пласт простого строения имеет мощность 1 м. В его кровле глинистый сланец мощностью 20-30 м, а в почве песчаный сланец (1,2 м) и мощный пласт песчаника (30 м). 12 сейсмоприемников располагаются по центру пласта на расстоянии 10 м друг от друга (первый удален от источника колебаний на 40 м). Доминирующей волной является боковая волна сдвига с частотой около 200 Гц (ее фронт отмечен одинарной линией), что соответствует реально полученным результатам сейсмо-

разведки. Четко прослеживается процесс формирования каналовой волны с частотой в диапазоне от 300 до 500 Гц (фронт отмечен двойной линией). На практике она практически не наблюдалась ввиду наличия реального затухания. В модели использовалась решетка с шагами дискретизации $\Delta x = 1.00$ м, $\Delta z_m = 0,33$ м.

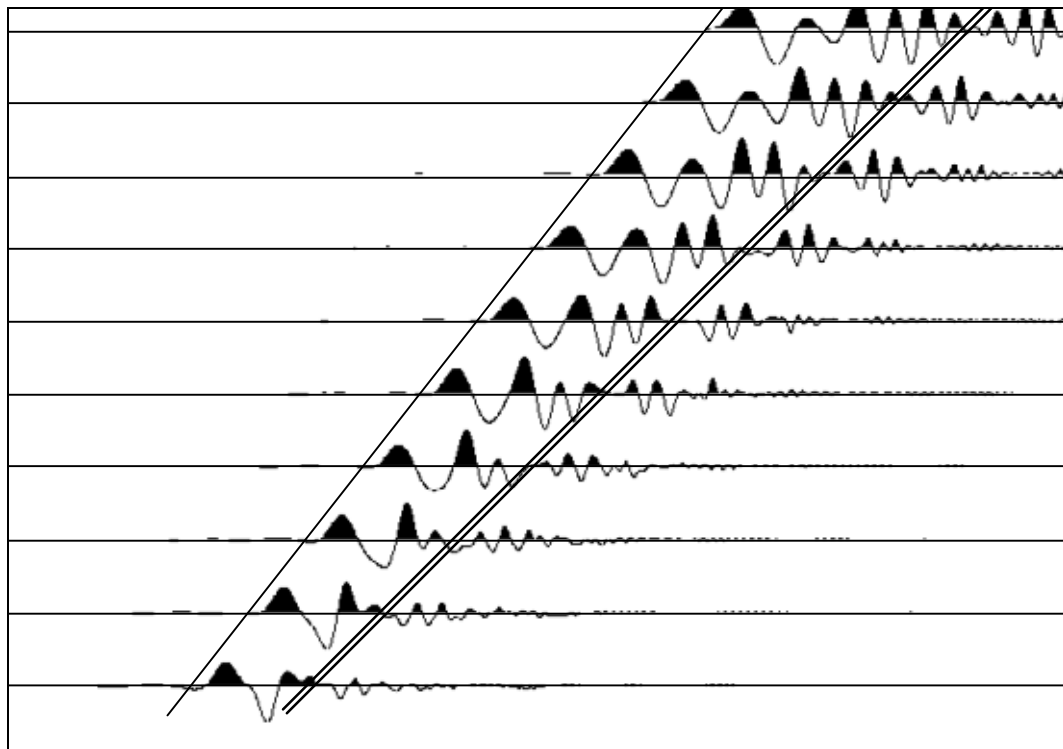


Рис. 1 – Теоретические сейсмограммы Y компоненты волнового поля, рассчитанные для реальных горно-геологических условий залегания угольного пласта g_2 (ГО АО «Шахта «Коммунист», 9-й северный конвейерных ходок в целиковой части шахтного поля).

Расчеты по стандартным схемам [4, 5] дают те же результаты, но требуют втрое большего времени расчета.

ВЫВОД

Предлагаемый алгоритм расчета волновых полей может быть рекомендован к использованию в методиках проведения практических прогнозных экспериментов, предусматривающих предварительный анализ ожидаемых характеристик волнового поля для выбора оптимальной схемы размещения системы наблюдений применительно к регистрации наиболее информативных параметров волновых пакетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров Н. Я., Яковлев Д. В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. - М.: Недра, 1988. - 199с.
2. Korn M., Stocl H. Reflection and Transmission of Love channel Waves at Coal Seam Discontinuities Computed with A Finite-Difference Method. - J. Geophys., 1982, 50, p. 171-176.
3. Глухов А.А., Захаров В.Н., Рубан А.Д. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей/Горный вестник, Москва, ИГД Скопинского, 1994, С.16-18
4. Анциферов А.В. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей/ Збірник наукових праць №5 “Проблеми гірського тиску” 2001. С.5-15.

5. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. - Донецк: изд. "Алан", 2002, -312с.
6. Бреховских Л.М. Распространение волн в слоистых средах. - М.:Наука, 1973.

УДК 622.235.004.2:502.64

А.Я. Бережецкий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Набійка свердловинних зарядів ВР виконує три основні задачі: підвищує корисну дію вибуху на подрібнення порід за рахунок більш повного використання газоподібних продуктів детонації, зменшує розліт кусків породи під час вибуху, а також обсяг пило- газових викидів в атмосферу кар'єру. В статті наведені експериментальні данні, які підтверджують ефективність різних типів набійки свердловин.

TECHNOLOGICAL AND ECOLOGICAL SAFETY OF BLASTING

The blasthole stemming carry out three essential tasks: increase the useful effect by improving employment of detonation products, reduce the flyrock during blasting and amount of the dust and toxic fumes in quarry atmosphere. In the article experimental data that confirm the effectiveness of the different blasthole types are adduced.

Безопасность взрывных работ, конечная цель которых – качественная подготовка горной массы при минимальных затратах на их производство, является неотъемлемой частью технологических приёмов, средств и методов взрывания. При этом под безопасностью понимаются не действия персонала, определяемые Едиными правилами безопасности при ведении взрывных работ, что, само собой разумеется, а безопасность, связанная с последствиями конкретного массового взрыва, выражающимися в разлёте кусков породы при взрыве, действием воздушной ударной волны, сейсмическом эффекте, а также во вредном воздействии продуктов взрыва на окружающую среду.

Принимая во внимание, что при этом затрагивается огромный круг вопросов, связанных с производством и оценкой взрывных работ, остановимся лишь на одном из основных, а именно, конструкции скважинных зарядов.

Конструкция скважинного заряда определённого диаметра представлена тремя основными элементами: колонка заряда ВВ, забойка и средства инициирования. Тип ВВ, как правило, определяется условиями взрывания: крепость и обводнёность горных пород. Изменять состав ВВ мы не имеем права, а посему влияние конкретного ВВ на объём выбросов газов при взрыве можно считать неизменным. Средства инициирования, несомненно, оказывают влияние на безопасность, а точнее, на надёжность взрыва. Прежде всего, детонирующий шнур (ДШ). Отказы, которые происходят при массовых взрывах в карьерах, чаще всего связаны с качеством шнуров: утонения сердцевины, пропуски тэна и др. Это приводит к одиночным и групповым отказам скважинных зарядов ВВ, ликвидация которых небезопасна и наносит материальный ущерб из-за простоев предприятия. При детонации нитей ДШ, проложенных через забойку к промежуточным детонаторам скважинных зарядов, в материале забойки образуют-