

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В УГЛЕНОСНОЙ ТОЛЩЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Глухов А.А.

Донецкий государственный научно-исследовательский проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела (УкрНИМИ) НАН Украины

Abstract

Gluchov A.A. Automation of field calculation of seismic vibrations in a coal-ore layer at the task decision of mine seismology service. By the example of software package to simulate propagation of seismic transients within coal-bearing series developed and used in the UkrNIMI of NANU principles for producing systems of such purposes are described. A number of solutions are given that allow employing software environment efficiently in engineering procedures of underground and land seismic exploration.

Развитие компьютерных технологий открыло дорогу к разработке современных подходов к моделированию процесса распространения сейсмических колебаний в углевмещающей толще горных пород, которые основаны, в частности, на использовании метода конечных разностей (МКР) [1,2,3,5,7]. Этому способствовала простота соотношений и удобство реализации волновых уравнений на ЭВМ, простота подготовки исходных данных, применимость расчетной схемы для моделей любой сложности с учетом геологических нарушений любых типов. Объем и сложность решаемых задач ограничивается только мощностями ЭВМ. В целом ряде работ были подробно исследованы практические вопросы реализации метода на ЭВМ, в том числе анализ источников погрешностей метода и способы их устранения [1–5, 7–8]. В СССР теоретические исследования по разработке различных алгоритмов реализации конечно-разностной схемы применительно к решению задачи о распространении сейсмических волн угленосной толще проводились начиная с 80-х годов 20-го века в Подмосковном научно-исследовательском угольном институте (ПНИИУИ), Украинском филиале ВНИМИ (ныне УкрНИМИ НАН Украины). Были разработаны программные средства [2,5,7,10], впервые реализующие конечно-разностную схему для расчета волнового поля в угленосной толще в удобном для практического применения виде. В то же время, новейшие методы многоволновой сейсморазведки, основанные на комплексном анализе сейсмических колебаний различной природы, требуют разработки современных программных средств анализа волновых полей. Решение данной актуальной задачи является важной составляющей сложнейшей проблемы достижения энергетической независимости Украины.

Разработанный комплект программ базируется на идеологии применения идеально упругой модели Гука, в которой среда описывается объемной плотностью ρ и два модуля упругости для объемных и сдвиговых деформаций (коэффициентами Ламе) [6,7]. Через них выражаются три сейсмических параметра: плотность ρ , скорости распространения продольных V_p и поперечных V_s волн. Упругие модели среды достаточно полно отражают неоднородности строения среды и позволяют получить все используемые в практической сейсморазведке типы волн: продольные, поперечные, обменные, поверхностные [6,7].

Как показано в целом ряде работ, расчетные соотношения по трехслойной схеме, описывающие распространение сейсмических волн в углевмещающей толще, можно записать в обобщенном виде [5,7,10]:

$$u_{kij}^+ = a_{kij} u_{kij}^- + b_{kij} u_{kij} + \sum_{M_{ij}} \left(c_{kM_{ij}} u_{kM_{ij}} + d_{klM_{ij}} u_{lM_{ij}} + d_{kpM_{ij}} u_{pM_{ij}} \right) \Big|_{k \neq l \neq p} + \sum_{N_{ij}} \left(f_{klN_{ij}} u_{lN_{ij}} + f_{kpN_{ij}} u_{pN_{ij}} \right) \Big|_{k \neq l \neq p}, \tag{1}$$

где u_{kij}^+ , u_{kij} и u_{kij}^- — значения компоненты k смещения в узле e_{ij} в последующий (вычисляемый), текущий и предыдущий моменты времени, соответственно; M_{ij} и N_{ij} — наборы из соседних узлов (см. рис. 1); $u_{kM_{ij}}$ и $u_{kN_{ij}}$ — значения компоненты k смещения в узле их соответствующего набора; коэффициенты при смещениях являются, в общем случае, функциями упругих констант, плотности, нормальных напряжений и деформаций, а также шагов дискретизации модели в пространстве и по времени.

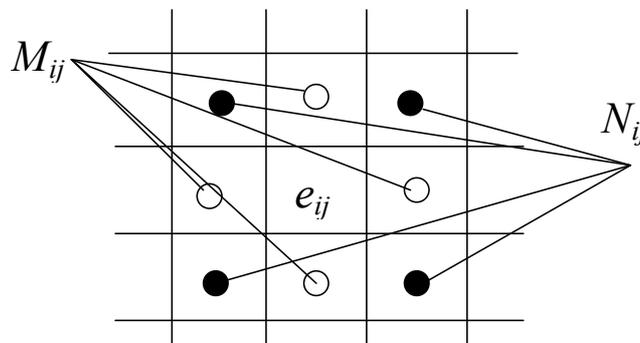


Рисунок 1 — К пояснению соотношений описывающих распространение сейсмических волн в угле вмещающей толще

Реализованный в комплексе программ алгоритм расчета волнового поля основан на использовании соотношений (1) для расчета смещений в рабочей области модели и на методе Корна и Стока [3] гашения колебаний у границ решетки путем введения зоны вязкости. Используется решетка с максимальным числом ячеек равным 480000. Ячейки (прямоугольной формы) могут иметь различные размеры для различных областей модели. При решении двухмерной задачи в плоскости геологического разреза на смещение в текущем узле влияют смещения в 8 соседних узлах, а при решении задачи в пространстве — в 26.

Остановимся подробнее на некоторых особенностях реализации комплекса. Его структура схематически изображена на рис. 2. Все программные модули обмениваются информацией через систему файлов в формате ASCII, что дает возможность их редактирования средствами операционной системы либо редакторами текстов. Это существенно снижает время подготовки входных параметров для расчета очень сложных моделей.

Входными параметрами для основной расчетной процедуры являются:

- ширина и длина модели (в метрах);
- разбиение модели на элементарные прямоугольные ячейки;
- шаг по времени;
- границы областей, отличающихся упругими характеристиками;
- значения упругих параметров для каждой области либо закон изменения параметров в границах области;

- система наблюдений (координаты источника либо источников, количество приемников и их координаты);
- функция источника либо источников, в случае, если моделируется возбуждение синхронно производится в ряде элементов модели, тип, направление удара (для ударных источников).

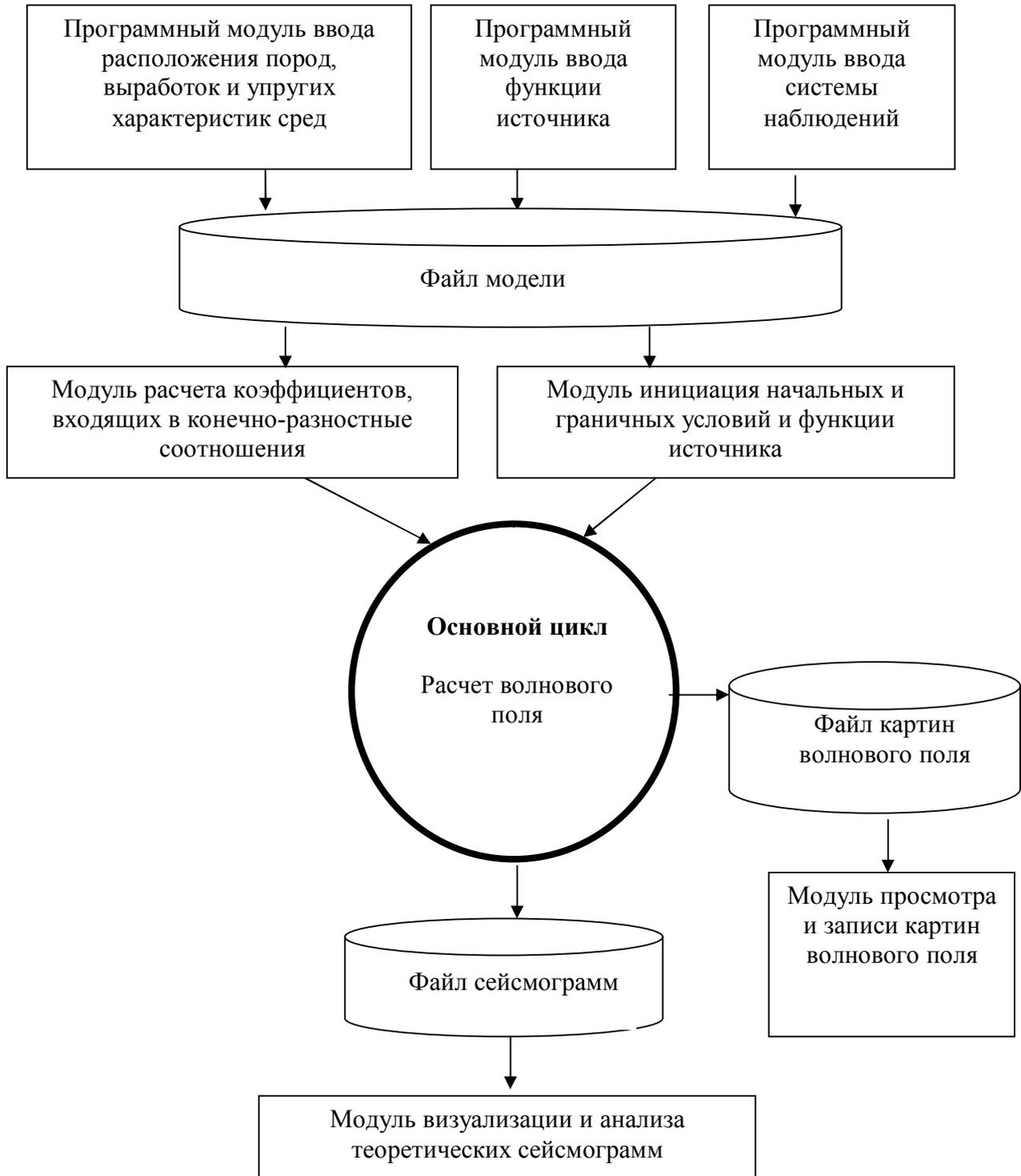


Рисунок 2 — Обобщенная схема программного комплекса расчета сейсмических полей

Первые пять параметров задаются стандартными процедурами, которые практически одинаковы во всех программных средствах подобного назначения и поэтому не требуют детального рассмотрения. Остановимся подробнее на модуле создания функции источника. Его структура показана на рис. 3.

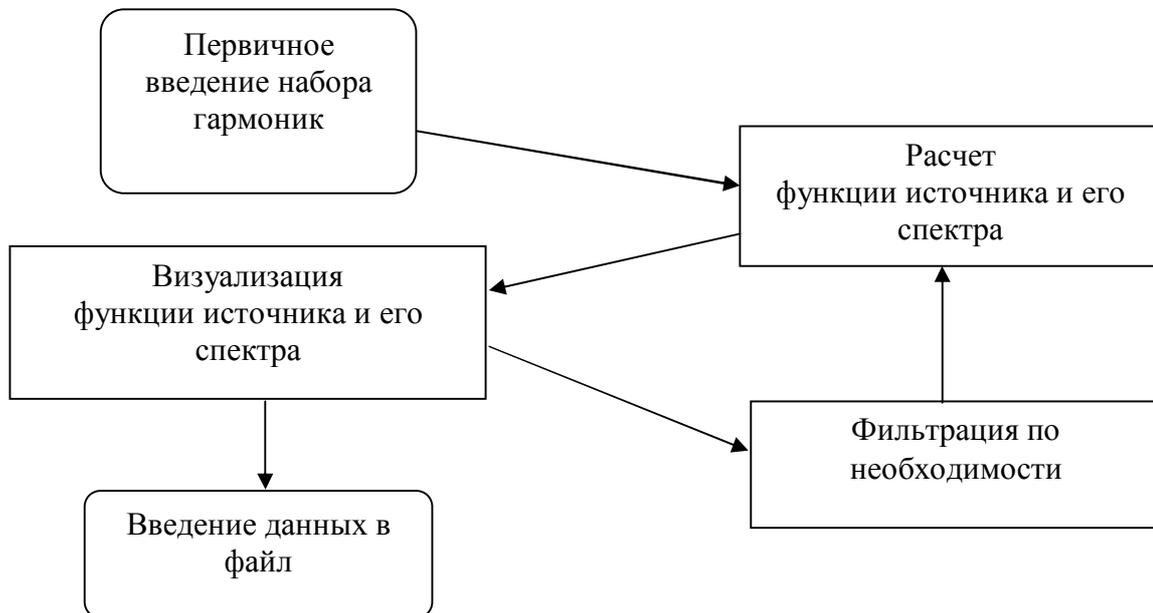


Рисунок 3 — Структурная схема модуля работы с функцией источника

Первичное введение функции источника предусмотрено тремя разными способами. Во-первых, введением гармоничного источника (автоматически для тестовых целей). Во-вторых, чтением функции источника из уже существующего файла функции источника. Этим достигается возможность внесения изменений в предварительно заданную функцию. В-третьих, для создания функции источника предусмотрен алгоритм задания формы источника из участков кривых гармоничных функций.

Полученная одним из способов, функция источника подвергается быстрому преобразованию Фурье (БПФ) для получения спектра. Затем производится её визуализация и анализ спектральной характеристики. В случае необходимости пользователь может применить процедуру фильтрации для преобразования функции источника, снова визуализировать его вид и частотную характеристику, и так далее, до тех пор, пока не достигнет необходимого результата. В случае неудачи преобразований, предусмотрена возможность возвращения к первоначальному виду функции. Временной шаг функции источника выбирается в соответствии с тем значением, которое задано в файле модели. Предусмотрена проверка на устойчивость решения при избранном шаге.

Расчеты коэффициентов при смещениях вынесены в отдельный блок за тело основного цикла, что обеспечивает быстрый расчет поля в отдельные моменты времени. Комплекс позволяет выполнять до 8000 циклов за 25 минут на модели максимальных размеров на ЭВМ Pentium IV с тактовой частотой 2 Гг.

Применение программного комплекса позволило рассчитывать процессы распространения сейсмических волн для обобщенных и конкретных моделей горно-геологических условий залегания угольных пластов [7, 9] при оптимальном шаге 0,2–0.5 м, базой наблюдений 115–170 м. Принимались во внимание породы, находящиеся на

расстоянии 30–50 м выше и ниже пласта. При этом наименьшая анализируемая мощность пласта достигалась 0.6 м, предельная частота — 900–100 Гц [7].

Расчет задачи может быть остановлен на любом шаге. При этом возможен анализ промежуточных результатов и, если необходимо, продолжение расчета с той же позиции.

Комплект программ предусматривает просмотр и сохранение в виде растрового изображения мгновенных картин процесса распространения сейсмических волн, являющихся мощным инструментом анализа структуры волновых полей [5,7,9]. При этом для удобства визуализируется координатная сетка и контуры областей модели. Для показа разных амплитуд смещений может быть использована цветовая гамма либо оттенки серого (по выбору).

Специальные программные модули предназначены для визуализации, обработки и анализа результатов расчета теоретических сейсмограмм. Блок анализа результатов моделирования содержит набор следующих процедур.

1) Процедура визуализации наборов теоретических сейсмограмм. При этом предусмотрен вывод сейсмограмм с использованием различных правил нормировки и коэффициентов усиления. Допускается как вывод информации по отдельным компонентам волнового поля, так и вывод информации по всем компонентам сразу. Автоматизирован процесс построения огибающих.

2) Спектральный анализ волновых пакетов и сейсмограмм в целом позволяет не только получать информацию о спектральных характеристиках волновых пакетов, но и производить частотную фильтрацию. При этом используются процедуры прямого и обратного БПФ. Данная процедура фильтрации может быть применена, в частности, для учета реального поглощения в среде по методу, изложенному в [7], поскольку позволяет использовать фильтры самой разнообразной конфигурации.

3) Скоростной анализ волновых пакетов позволяет анализировать информацию о скоростных характеристиках волновых пакетах, а также проводить скоростную фильтрацию сейсмограмм. При этом предусмотрена возможность анализа как проходящих, так и отраженных волн. В последнем случае пользователь задает наборы отражающих границ, формирующих исследуемые волновые пакеты.

4) Поляризационный анализ полезен для идентификации природы волновых пакетов, поскольку применяемые на практике в качестве инструментов типы сейсмических колебаний имеют существенно разные поляризационные характеристики [7].

Алгоритмы реализованы на Delphi 5.0 с использованием стандартных графических функций Windows API. Необходимый объем свободного места на диске составляет 200 МБ (для введения промежуточной информации).

Рассмотрим проблему, которая не была решена в рамках предыдущих разработок [5,10,11]. Как известно, в рамках используемой упругой модели Гука при расчете компонент смещений волнового поля в заданной точке невозможно учесть поглощение среды. Да и в рамках других моделей это крайне сложно, поскольку колебания достигают источника по-разному, проходя различное расстояние по разным породам, претерпевая многократные отражения, преломления и трансформации на границах раздела сред. Учет этого многообразия в полной мере возможен только в рамках самых простых моделей. В итоге, в настоящее время при использовании численных методов доминирует упрощенный подход, рассматривающий коэффициент поглощения β как усредненный интегральный показатель [7]. Его учет имеет оценочный характер и производится с помощью фильтрации теоретических сейсмограмм.

В разработанном программном комплексе предложен подход, который позволяет учесть вклад поглощения среды, принимая во внимание реальные пути

распространения колебаний и трансформации на границах раздела сред и на неоднородностях.

Можно считать, что соотношение (1) соответствует физико-математической модели, в рамках которой любое смещение в центре элемента $e_{m,n}$ представляется в виде суперпозиции различных типов слагаемых. Первый из них описывает волны, пришедшие за единичный временной интервал с 8 направлений (в трехмерном случае их 26), от центров соседних элементов. Причем, при вычислении k -й компоненты смещения, коэффициенты $c_{kM_{ij}}$ представляют собой вклад той же компоненты смещений в элементах из набора M_{ij} , коэффициенты $d_{klM_{ij}}$ учитывают вклад компоненты l смещения, а также её трансформацию для элементов из того же набора, а $f_{klN_{ij}}$ «работают» подобно $d_{klM_{ij}}$ для набора элементов N_{ij} .

Вне зависимости от того, как долго эти волны реально были в пути, они прошли известный путь (расстояние между центрами элементов) по известным породам с известными локальными значениями коэффициентов поглощения. Тогда выражение (1) может быть записано в виде:

$$u_{kij}^+ = a_{kij}u_{kij}^- + b_{kij}u_{kij} + \sum_{M_{ij}} \left(c_{kM_{ij}} \Delta_{kkM_{ij}} u_{kM_{ij}} + d_{klM_{ij}} \Delta_{klM_{ij}} u_{lM_{ij}} + d_{kpM_{ij}} \Delta_{kpM_{ij}} u_{pM_{ij}} \right) \Big|_{k \neq l \neq p} + \sum_{N_{ij}} \left(f_{klN_{ij}} \Delta_{klN_{ij}} u_{lN_{ij}} + f_{kpN_{ij}} \Delta_{kpN_{ij}} u_{pN_{ij}} \right) \Big|_{k \neq l \neq p}, \quad (2)$$

где $\Delta_{klM_{ij}}$, $\Delta_{klN_{ij}}$ и им подобные коэффициенты будут описывать поглощение колебаний при перемещении от узла к узлу. Легко показать, что данные коэффициенты имеют вид:

$$\Delta_{klM_{ij}} = e^{-\left(r_{ijM_{ij}} \beta_{kij} + r_{M_{ij}ij} \beta_{lM_{ij}} \right)}, \quad \Delta_{klN_{ij}} = e^{-\left(r_{ijN_{ij}} \beta_{kij} + r_{N_{ij}ij} \beta_{lN_{ij}} \right)}, \quad (3)$$

где $r_{ijM_{ij}}$ и $r_{M_{ij}ij}$ — часть расстояния между центрами ячейки ij и M_{ij} , которое нужно пройти колебаниям по ячейкам ij и M_{ij} соответственно; β_{kij} и $\beta_{kM_{ij}}$ представляют собой коэффициенты поглощения для компоненты смещения k в ячейке ij и M_{ij} соответственно. Тот же смысл и у выражений, где присутствует N_{ij} . В выражении (3) при $k \neq l$ мы имеем дело с трансформацией волны.

Как известно [6], волны сдвига и сжатия имеют в средах различные коэффициенты поглощения. Этот факт достаточно хорошо известен в практике как наземной, так и шахтной сейсморазведки [5, 6, 12]. Выражения (2) и (3), строго говоря, записаны из соображений, что коэффициенты поглощения зависят от компоненты смещения k . Однако, можно показать, что они будут иметь тот же вид и с учетом того, с волной сдвига или сжатия мы имеем дело. Рассмотрим рис. 4.

На рис. 4 для примера показаны 4 из 9 ячеек, участвующих в расчете смещения в ячейке e_{ij} . Легко заметить, что в получении значения Z компоненты смещения в этой ячейке будут, в общем случае, участвовать X и Z компоненты смещений в ячейках, условно обозначенных как 1, 2 и 3. Причем:

- u_z в ячейке 1, распространяющееся по направлению к центру e_{ij} , является волной сжатия;
- u_x в ячейке 1, распространяющееся по направлению к центру e_{ij} , является волной сдвига;

- u_x в ячейке 3, распространяющееся по направлению к центру e_{ij} , является волной сжатия;
- u_z в ячейке 3, распространяющееся по направлению к центру e_{ij} , является волной сдвига;
- $\frac{\sqrt{2}}{2} u_x$ и $\frac{\sqrt{2}}{2} u_z$ в ячейке 2 являются и частью волны сдвига и частью волны сжатия.

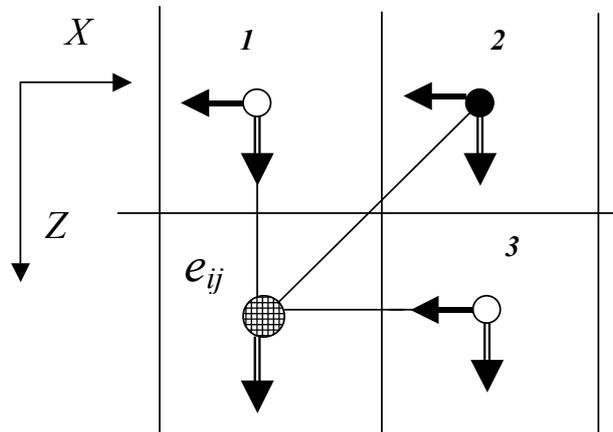


Рисунок 4 — К решению задачи об учете коэффициента поглощения для волн сдвига и сжатия

Исходя из этого, в расчетных соотношениях (3) для смещений в ячейках из набора M_{ij} берутся значения коэффициентов поглощения либо для волн сжатия, либо для волн сдвига (согласно изложенной выше схеме). Перед смещениями в ячейках из набора N_{ij} используются усредненные значения коэффициентов поглощения волн различных типов.

Второй тип слагаемых (с коэффициентами a_{kij} и b_{kij}) можно трактовать как остаточную часть от колебаний в предыдущие моменты времени в том же элементе, при расчете которых ранее уже учитывался фактор поглощения.

Конечно, данный подход, как и общепринятый, имеет свои недостатки. Основную сложность вносит тот факт, что коэффициенты поглощения зависят от частоты. Эта зависимость достаточно хорошо изучена [1, 5, 9]. Она имеет сложный нелинейный характер. Этот факт вносит ограничение на диапазон применимости данного подхода. Мы можем считать его корректным в случае, если в рамках конкретной решаемой задачи в пределах частотного диапазона исследуемой части теоретического сигнала данным фактором можно пренебречь. Например, опираясь на приведенные в работе [9] графики модельных зависимостей данного параметра от частоты, можно сделать вывод о том, что в пределах низких частот (до 200–250Гц) они имеют практически линейный характер с относительно слабым возрастанием. Чем ниже частота исследуемого волнового пакета и уже его спектр, тем обоснованнее применимость данного метода.

Кроме этого в комплексе предусмотрена возможность применения предлагаемого подхода в суперпозиции с частотной фильтрацией готовых сейсмограмм [7], учитывающей фактор зависимости коэффициента поглощения от частоты.

Алгоритм учета поглощения среды был апробирован и показал работоспособность на тестовых примерах, на реальных моделях участков шахтных полей (ш. «Красноармейская – Западная», ш. «Краснолиманская», ш. «Сташкова», ш. «Коммунист») с геологическими нарушениями и без. Кроме этого, были проведены эксперименты по моделированию поглощения энергии сейсмических колебаний в зонах малых скоростей, в зонах повышенной

трещиноватости при анализе результатов прогнозных экспериментов методами наземной сейсморазведки (ш. Засядько, ш. «Краснолиманская», участок трубопровода «Грушевая-Шесхарис»).

Таким образом, в данной статье кратко описаны особенности реализации комплекта программ, решающий задачи моделирования процесса распространения сейсмических колебаний в толще пород. Комплект широко применяется в институте УкрНИМИ НАН Украины в методиках проведения исследований строения земной толщи. Описана его структура и ряд технологических решений, обеспечивающих его эффективное использование. Описан алгоритм учета поглощения сейсмических колебаний разной природы, показавший свою эффективность при проведении исследований в рамках реальных экспериментов по прогнозу строения горного массива.

Результаты данной статьи могут быть использованы специалистами в области проектирования программных средств, реализующих методы математического моделирования распространения сейсмических колебаний в земной толще.

Литература

1. Анциферов А.В. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей / Збірник наукових праць №5 «Проблеми гірського тиску» 2001. — С.5–15.
2. Анциферов А.В., Захаров В.Н., Глухов А.А. Комплект программ моделирования процесса распространения сейсмических волн в угленосной толще // Каталог прогр. Средств / ГосФАП, М. 1991.
3. Korn M., Stock H. Reflection and transmission of love channel waves at coal seam discontinuities computed with a finite-difference method // *Geophysics*. — 1982. — Vol.50. — P. 171–176.
4. Virieux J., Madariaga R. Dynamic faulting studied by a finite-difference method // *Bull. Seism. Soc. Am.* — 1982. — Vol.72. — P. 345–369.
5. Глухов А.А., Захаров В.Н., Рубан А.Д. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей / Горный вестник, Москва, ИГД Скочинского, 1994. — С. 16–18.
6. Бреховских Л.М. Распространение волн в слоистых средах. — М.: Наука, 1973.
7. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. — Донецк.: изд. «Алан», 2002. — 312 с.
8. 50910000379 Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S., Alford R.M. Synthetic Seismograms, a finite-difference approach // *Geophysics*. — 1976. — Vol.41. — P. 2–27.
9. Анциферов А.В. Обобщенные характеристики волновых полей, формируемых на угольных пластах Украины при применении сейсмоакустического метода прогноза условий залегания угля // Физико-технические проблемы горного производства. — Донецк: ИФГП. — 2002. — Вып. 6. — С. 105–115.
10. Глухов А.А., О программном комплексе моделирования сейсмических колебаний в угленосной толще / Наукові праці Національного технічного університету. — Донецьк: ДонНТУ, 2005. — Вип. 88. — С. 106–113.
11. Глухов А.А., Математическое моделирование сейсмических полей в задачах шахтной сейсморазведки / Геотехническая механика, 2004. — №49. — С. 87–92.
12. Захаров В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. — М.: ФГУП ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. — 172 с.