

УДК 550.834; 622.12

**О ПРОБЛЕМАХ И ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ
РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Анциферов А.В., Глухов А.А., Педченко М.А. (*УкрНИИМИ НАН
Украины*)

У даній статті дано короткий аналіз підсумкам застосування різних методів математичного моделювання в галузі шахтної сейсморозвідки. Проведено порівняння їхніх можливостей і недоліків. Сформульовано проблеми, рішення яких дозволить перевести систему знань про процес формування хвильових полів в порушеному вуглепородному масиві в принципово нову якість, розробити досконаліші критерії прогнозу геологічних порушень вугільних пластів, які підвищать ефективність і надійність методів шахтної сейсморозвідки.

**ABOUT PROBLEMS AND PROSPECTS OF THE USE METHODS
OF MATHEMATICAL DESIGN AT THE DECISION OF TASKS
IN THE MINE SEISMIC PROBLEM**

Anziferov A.V., Glukhov A.A., Pedchenko M.A.

A short analysis of the results of using different methods of mathematical simulation in the field of seismic prospecting is given. Their capabilities and drawbacks are compared. Problems are formulated solving of which will allow to transfer knowledge system of wave field generation in disrupted coal-rock mass to a fundamentally new quality, to work out more perfect criteria to predict geologic faults in coal beds that will improve efficiency and reliability of underground seismics techniques.

Из всего многообразия геофизических методов разведки месторождений полезных ископаемых сейсмическая разведка занимает первое место по многообразию решаемых геологических задач, решаемых с ее помощью, а также по разрешающей способности и глубинности. С помощью сейсмоакустического метода осуществляется прогноз различных типов нарушениями углепородного массива, основными из которых являются [1-3]:

– тектонические нарушения (сбросы, взбросы, надвиги) с амплитудой смещения 0,5 мощности угольного пласта и более;

Прогноз и управление состоянием горного массива

– мульдобразные погружения угольного пласта с разрывом и без разрыва сплошности с размерами 0.25 длины лавы и более с углами наклона крыльев мульд более 15-20°;

– утонения, размывы, замещения угольных пластов с размерами в плане лавы или участка шахтного поля 30м и более;

– послеугленосные карстовые нарушения с разрывом сплошности угольного пласта, с оценкой размера нарушения, расположения в плане выемочного столба, состава пород заполнителей карстовых воронок, степени обводненности;

– расщепления и увеличения мощности породного прослоя в угольном пласте;

– зоны концентрации напряжений и зоны трещиноватости не приуроченные к тектоническим и другим видам нарушений.

С начала развития шахтной сейсморазведки и по сей день, она опирается на теоретический анализ волновых полей, основанный на применении методов математического моделирования. В условиях перехода к отработке угольных пластов, имеющих все более сложные горно-геологические условия залегания, такой подход является чрезвычайно актуальным. В настоящее время теоретические исследования направлены на изучение все более тонких механизмов возбуждения, распространения, регистрации и анализа сейсмоакустических волновых полей. Процессы формирования волнового поля и его взаимодействия с угленосным массивом настолько сложны, а регистрируемые упругие колебания несут такой огромный объем информации о строении и физико-механических свойствах пород, что дальнейшее развитие шахтной сейсморазведки невозможно без разработки новейших эффективных методов математического моделирования. При этом чрезвычайно актуальной задачей является на данный момент выработка первостепенных задач, которые подлежат решению и выбор методов, с помощью которых можно достичь успеха. Этим вопросам посвящена данная статья.

Для решения данной задачи необходимо дать анализ возможностям различных методов и результатам их применения на практике.

В настоящее время математического моделирование в шахтной сейсморазведке применяется по двум основным 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 харак-

теристик 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. В данной статье приведен краткий сравнительный анализ методов математического моделирования, используемых при решении задач шахтной сейсморазведки и сформулированы направления их дальнейшего развития.

Началу использования методов математического моделирования в данной области положил Т. Креу [4], доказавший принципиальную возможность каналирования сейсмической энергии в угольных пластах, как в слоях с пониженными относительно вмещающих пород скоростными параметрами. Он получил исходные уравнения для расчета дисперсионных кривых каналовых волн Лява и Релея в плоскопараллельной однослойной и симметричной относительно центра пласта модели. Задача была решена в постановке, которая не позволяла рассчитывать теоретические сейсмограммы, учитывающие реальную спектральную характеристику источника, но значение этих исследований было выдающимся. Было не только положено начало математическому моделированию в области шахтной сейсморазведки, но и выделен её основной инструмент (как показала история – на ближайшие 30-40 лет) – каналовые волны.

В течение первых двух десятков лет, до конца 80-х, объектом моделирования выступали практически только волны вышеуказанного типа. При этом для математического описания процесса распространения сейсмических волн в ненарушенной среде нашли широкое применение матричные методы [5-14], позволяющие, в первую очередь, получить дисперсионные соотношения для фазовых и групповых скоростей. Для описания процесса взаимодействия сейсмических колебаний с нарушением использовались подходы, основанные на сопряжении решений на трех последовательных участках угленосной толщи (интерференционная каналовая волна на ненарушенном пласте перед нарушением и за ним, а также объемная волна в зоне нарушения) [1, 24-28].

Матричные методы основаны на модели среды, состоящей из набора однородных слоев пород с плоскопараллельными границами. Их суть состоит в том, что внутри каждого из слоев распространение плоской волны описывается уравнением вида:

Прогноз и управление состоянием горного массива

$$u(x, y, z, t) = f(z) \cdot \exp[j\omega(k_x \cdot x + k_y \cdot y - t)],$$

где $f(z)$ - вектор, удовлетворяющий системе линейных дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \mathbf{A}f, \quad (1)$$

где матрица \mathbf{A} имеет зависит от упругих постоянных слоя, частоты сигнала ω и значений k_x, k_y , которые определяют направление распространения плоской волны. Элементы матрицы \mathbf{A} имеют разрывы на границах слоев, однако решение $f(z)$ при этом остается непрерывным. В соответствии с общей теорией решения линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, общее решение уравнения (1) есть линейная комбинация

$$f_i(z) = u_i \exp[\lambda_i (z - z_0)], \quad i=1, \dots, N,$$

где значения λ_i представляют собой собственные числа матрицы \mathbf{A} , а u_i - нормированные собственные вектора матрицы \mathbf{A} , которые задают направления колебаний частиц среды (векторы поляризации) в однородной среде и по закону Гука связаны с компонентами тензора упругости, N - ранг матрицы \mathbf{A} , который может быть разным в различных разновидностях метода.

Основу матричным методам положил Thomson [5], в дальнейшем усовершенствованный Haskell [6], основанный на использовании матриц четвертого порядка. Его проблематично было применить на практике при вычислении дисперсионных зависимостей на больших частотах и на скоростях близких к скоростям распространения сдвиговых и продольных волн в угле и породах. Среди наиболее удачных путей решения данной проблемы следует отметить подходы Л.А. Молоткова [7-9] и Dunkin J. [10], которые избегали погрешностей счета на основе использования матриц более высоких рангов. Практически полное устранение вышеупомянутых недостатков метода было проведено А. Абу-Zena [11], который использовал свойства симметрии исходных матриц четвертого порядка, сумел их записать в виде, исключаящем потерю точности результата. При этом ранг матрицы не изменился. А. Абу-Zena добился удобства применения метода для реализации расчетов на ЭВМ. Данный подход широко применялся на практике для расчета дисперсионных

кривых и теоретических сейсмограмм интерференционных каналов волн в УкрНИМИ (тогда УФ ВНИМИ) и в ПНИУИ [1, 2]. Следует также упомянуть о методе функциональных операторов, как об одной из разновидностей матричных методов, разработанном в МГИ В.Н. Даниловым и А.З. Вартановым [13,14]. Матричные методы моделирования сейсмических волновых полей позволяют производить расчеты для достаточно сложных моделей, в частности, с учетом различных механизмов затухания, с учетом анизотропии пластов угля и пород, их пористости и трещиноватости. Например, версия матричного метода, разработанная Takeuchi H., Saito. M. [12], была обобщена на случай, когда слои имеют орторомбическую симметрию, одна из осей которой направлена вертикально, а другие расположены произвольно. Кроме того, в данной версии метода предусмотрена возможность учета поглощения.

С помощью матричных методов были получены зависимости кинематических и динамических характеристик каналовых волн различной поляризации от параметров вмещающих пород, от мощности и структуры пласта [15-16]. Были изучены вопросы дисперсии фазовой и групповой скоростей, вопросы затухания каналовых волн [17-20], исследованы их спектральные характеристики. К 80-м годам 20-го века были обобщены итоги применения матричных методов для задач сейсморазведки, разработаны наиболее обобщающие их формулировки, оценены их особенности и недостатки [1,21-23]. Матричный метод превосходно зарекомендовал себя на начальном этапе становления шахтной сейсморазведки как универсальный метод анализа процесса формирования сейсмических колебаний углевмещающей толщей.

Однако, матричные методы позволяют получить не полную картину волнового поля в угле и вмещающих породах, а только часть ее, обусловленную отдельными видами интерференционных процессов в среде. Как показал опыт их использования применительно к задачам шахтной сейсморазведки, они могут достаточно близко к реальности описывать каналовые волны и в меньшей мере - волны иной природы [1,2]. При этом практически невозможно описать процессы обмена энергией между пакетами разной природы, приводящие к взаимообусловленным изменениям в их строении. И, наконец, главный недостаток матричных методов состоит в невозможности промоделировать процесс распространения сигнала через нарушение. Эта особенность матричных методов существенно ограничивают их применимость.

Прогноз и управление состоянием горного массива

Для решения данной проблемы а начальных этапах развития шахтной сейсморазведки использовались подходы, основанные на сопряжении решений на ненарушенных участках угленосной толщи и в зоне аномалии. Например, в ПНИУИ был предложен широко использовавшийся в то время способ математического описания процесса взаимодействия сейсмических волн с нарушениями угольного пласта, основанный на поиске и последующем сопряжении решений на трех последовательных участках угленосной толщи (интерференционная каналовая волна на ненарушенном пласте перед нарушением и за ним, объемная волна в зоне нарушения). С помощью данного подхода удалось теоретически обосновать возможность прогноза карстовых нарушений путем анализа коэффициентов поглощения интерференционных каналовых волн [24], получить количественные оценки значений коэффициентов их затухания в зависимости от частоты, параметров угля, вмещающих пород, наличия и степени обводненности карстовых нарушений [25]. На этой основе был разработан целый ряд критериев прогноза нарушений данного типа и рекомендаций по методам интерпретации шахтного материала. Представляет несомненный интерес решенная В.Н. Даниловым и А.З. Вартановым задача о распространении волнового поля через скачкообразное изменение мощности волновода и через тектонические нарушения с различной амплитудой [26,27]. При этом на ненарушенных участках использовалось приближение абсолютно отражающих границ пласта с вмещающими породами. Также был разработан ряд обобщенных физико-математических моделей тектонических нарушений угольного пласта [1, 28]. Можно отметить, что большинство описанных выше подходов основаны на использовании модели, изображенной на рис. 1, разработанной Н.Я. Азаровым [1]. Ее особенность заключается в том, что нарушение рассматривается в пределах угольного пласта.



Рис. 1. Обобщенная модель нарушения угольного пласта

Возможность применения указанной модели и подхода, основанном на сопряжении решений базируется на следующих предположениях:

1. Угольный пласт можно рассматривать как волновод. Этот факт был теоретически обоснован Т.Кгеу [4]. Практически он был многократно доказан, в частности, в результате планомерных исследований ПНИУИ и УкрНИМИ (тогда УФ ВНИМИ) [1, 3].

2. Основным инструментарием шахтной сейсморазведки выступали каналовые волны, практически не выходящие за пределы угольного пласта. Их теория достаточно хорошо известна [1, 3, 29]. Было доказано теоретически [29] и экспериментально подтверждено [1], что энергия сейсмоакустических колебаний на расстоянии порядка длины волны падает практически до нуля .

3. Изменение физико-механических свойств угля (плотность, скорости распространения волн сдвига и волн сжатия) в зонах нарушения, сопровождающихся повышенной трещиноватостью, в несколько раз сильнее, чем изменение аналогичных свойств в породах. Этот факт достаточно хорошо исследован экспериментально Н.Е. Фоменко [30].

4. Шахтная сейсморазведка, по сути, позволяет регистрировать не само нарушение, а зону изменения физико-механических свойств, им порождаемую.

Кроме этого следует указать на еще одну причину, почему такой достаточно упрощенный подход широко применялся на практике. Уровень развития ЭВМ не позволял применять математический аппарат, способный оперировать с более сложными моделями.

В настоящее время прогрессирующие темпы развития ЭВМ способствуют применению численных методов для моделирования условий распространения сейсмических волн в среде. Использование численных методов расчета упругих колебаний в горном массиве, таких как метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), методы граничных элементов (МГЭ), (граничных интегральных уравнений) позволяет наиболее близко к реальности передать физику процесса возбуждения, формирования и взаимодействия с горными породами полного волнового поля.

Наибольшее распространение при существующем уровне развития ЭВМ получил МКР. Метод начал применяться в сфере сейсморазведки с конца 60-х годов. Это связано с появлением первых достаточно мощных ЭВМ. Приблизительно в это же время появляется

Прогноз и управление состоянием горного массива

ряд публикаций, посвященных использованию МКР для расчета теоретических сейсмограмм [31-33]. Полученные решения имели смысл лишь в малом начальном временном диапазоне ввиду неустойчивости решения. Вооге D.M. в 1970 году впервые применил метод конечных разностей в неоднородной постановке задачи для получения численного решения волнового уравнения в двумерной неоднородной среде [32].

Первым реализациям методам были присущи проблемы, вызванные тем, что процессы в неограниченной среде описываются с помощью ограниченной в пространстве модельной решетки, края которой, выступая математически в качестве свободной границы, порождают отражения колебаний. Со временем, эта проблеме было уделено особое внимание исследователей. Теоретические исследования, посвященные гашению или исключению из получаемых волновых полей отражений от границ модели, приведены в работах [34-36]. Наиболее оптимальный и эффективный метод борьбы с паразитными отражениями предложили Korn M. и Stock H. [35]. Для гашения отражений от искусственных границ модели предлагается использовать зону вязкости, которая позволяет погасить колебательный процесс по мере приближения его к внешним (искусственным) границам. Поскольку метод применяется в настоящее время повсеместно, уделим ему особое внимание.

В рамках упругой модели систему уравнений, описывающих движение частиц среды можно записать в виде [3]:

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (2)$$

где $\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}$ представляет собой силу внутренних напряжений, ρ – плотность, \ddot{u}_i – ускорение, $\sigma_{ik} = \lambda u_{ll} \delta_{ik} + 2\mu u_{ik}$ – тензор напряжения, u_{ik} – компоненты тензора смещения, λ и μ – коэффициенты Ламе. Тогда выражение (2) можно записать в виде:

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \lambda}{\partial x_k} u_{ll} \delta_{ik} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial x_k} u_{ik} + \lambda \delta_{ik} \frac{\partial u_{ll}}{\partial x_k} + 2\mu \frac{\partial u_{ik}}{\partial x_k} \quad (3).$$

Для описания колебательного процесса в зоне вязкости в дифференциальные волновые уравнения (3) вводится так называемое мни-

мое частотное затухание. Процедура эта достаточно проста и заключается в следующем. Каждое из исходных дифференциальных уравнений с помощью Фурье-преобразования из временной области переводится в частотную. Полученный квадрат частоты ω^2 заменяется выражением $(\omega - i\beta)^2$ где i - мнимая единица, β - коэффициент затухания. При возведении в квадрат указанного выражения имеем [35]:

$$(\omega - i\beta)^2 = \omega^2 - 2i\omega\beta + i^2\beta^2 \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в исходные уравнения вместо ω^2 и проводя обратное Фурье-преобразование из частотной области во временную получим систему дифференциальных уравнений

$$\rho \ddot{u}_i + 2\beta \dot{u}_i + \beta^2 u_i = \frac{\partial \lambda}{\partial x_k} u_{||} \delta_{ik} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial x_k} u_{ik} + \lambda \delta_{ik} \frac{\partial u_{||}}{\partial x_k} + 2\mu \frac{\partial u_{ik}}{\partial x_k}$$

Korn M. и Stock H. моделировали колебательный процесс в угольном пласте, помещенном между двумя полупространствами. Исследовался процесс формирования в модели волн SH-поляризации при различной нарушенности угольного пласта (разрыв со смещением в вертикальной и горизонтальной плоскостях). Несмотря на сильную упрощенность в моделировании нарушения угольного пласта, была доказана целесообразность применения конечноразностной схемы для задач шахтной сейсморазведки и, в частности, для исследования процесса распространения сейсмических волн через тектонические нарушения. Было показано, что решения, получаемые с помощью метода конечных разностей, хорошо согласуются с результатами, получаемыми аналитическими методами, обладая при этом более высокой точностью.

В СССР также проводились теоретические исследования по разработке алгоритма реализации конечноразностной схемы по методу [35] применительно к решению задачи о распространении сейсмических волн в дискретно-слоистой среде. В то время они не были решены, но приобретенный опыт был учтен в разработках УкрНИМИ, где был разработан программный комплекс [37, позволивший специалистам УкрНИМИ провести анализ целого ряда факторов, формирующих волновое поле в нарушенной и ненарушенной среде и разработать ряд методик применения МКР для решения практических задач [38-41]. Впервые было теоретически обосновано доминирование боковых волн в волновых полях, наблюдаемых в условиях

Прогноз и управление состоянием горного массива

угленосных формаций Украины, что позволило их эффективно использовать в качестве основного инструмента шахтной сейсморазведки [42-45]. Был проведен целый ряд теоретических исследований по изучению процессов прохождения различных типов сейсмических колебаний через тектонические нарушения, пликативы, размывы и другие аномалии в горно-геологических условиях залегания угольного пласта [46-50], что позволило разработать системы эффективно применяемых на практике прогнозных методик [3].

Первоначально реализованный в УкрНИМИ поход [37] основан на решении известного уравнения Ламе, которое можно записать в виде:

$$\rho \ddot{u}_i = \lambda \delta_{ik} \frac{\partial u_{ll}}{\partial x_k} + 2\mu \frac{\partial u_{ik}}{\partial x_k},$$

где u_{ik} – компоненты тензора смещения, ρ – плотность среды, λ и μ – коэффициенты Ламе.

Реализованная в [37] концепция моделирования не лишена ряда недостатков. В зоне нарушения, представляющей особый интерес в задачах шахтной сейсморазведки, угленосная толща не является однородной средой. Поэтому в ходе НИР был разработан программный комплекс [41], основанный на использовании уравнения движения в общем виде (3), учитывающем неоднородность среды. При этом в соотношении для λ и μ возможна замена на $\mu_{эфф} = \mu + \Delta\mu$ и $\lambda_{эфф} = \lambda + \Delta\lambda$, где $\Delta\mu$ и $\Delta\lambda$ рассматриваются как суммарные поправки за счет напряженного состояния горного массива, а также вносимые такими характеристиками среды как пористость и трещиноватость [40, 51]. Кроме этого в [41] предусмотрен механизм введения затухания сейсмических колебаний с расстоянием.

МКР позволяет в некоторой мере произвести учет влияния напряженного состояния горного массива. Такие исследования проводятся в УкрНИМИ НАН Украины и ИПКОН РАН [40,51]. Несмотря на то, что программные средства, разработанные в УкрНИМИ в настоящее время способны производить расчеты с учетом напряженного состояния горного массива, это представляется затруднительным, поскольку не существует на данный момент полного представления о распределении напряжений, а также упругих деформаций в нарушенной углевмещающей толще [3, 51].

Огромная методологическая ценность МКР в том, что он позволяет перейти от обобщенных геологических моделей к конкретным,

учитывающим реальные условия залегания угля на исследуемых участках шахтных полей. При этом модели могут быть очень сложными, учитывающими степень и характер изменения физико-механических параметров в зонах нарушений.

Современные методы математического моделирования разрабатываются параллельно с развитием ЭВМ и знаний в рассматриваемой предметной области. Для эффективного моделирования сейсмических волн, распространяющихся в сложно построенных геологических средах, нашли свое применение методы разностей высоких порядков [52]. Интересны исследования по применению метода конечных элементов [53-55]. Он очень сложен в реализации, особенно в задании конкретных моделей для расчетов, требует значительных ресурсов памяти и высокой производительности ЭВМ. Теоретически, его точность и устойчивость значительно выше, чем у метода конечных разностей. В настоящее время на основе этого метода реализованы первые программные средства (правда, пока не адаптированные к шахтной специфике) [54]. В [54] применен алгоритм параллельных компьютерных вычислений, необходимых для моделирования процесса распространения сейсмических волн. В основу алгоритма положены принцип Гюйгенса и эквивалентность задач Коши и Грина, обеспечивающих решение уравнения динамической упругости, которое выполняется с использованием дискретизации конечных элементов, что позволяет сократить время вычислений.

Есть первые опыты по использованию метода спектральных элементов, обеспечивающего эффективное моделирование волновых полей, распространяющихся в полностью анизотропных двух- и трехмерных упругих средах [56]. Установлено, что он эффективен при изучении гетерогенных анизотропных сред, а результаты его опробования практически полностью совпадают с данными расчетов, проведенных с использованием метода Фурье и МКР.

К преимуществам численных методов перед аналитическими следует отнести:

- относительная простота аналитических выражений и, следовательно, удобство реализации на ЭВМ;
- возможность расчета полного волнового поля в модели с произвольными анизотропными свойствами пород и произвольными типами нарушенности;
- в качестве исходной информации используются реальные свойства углепородного массива, и чем точнее они заданы в модели,

Прогноз и управление состоянием горного массива

тем ближе к реальности получается картина регистрируемых колебаний;

– сложность решаемых задач и качество получаемых результатов ограничивается только мощностью и быстродействием используемой ЭВМ.

Численные методы по отношению друг к другу имеют свои преимущества и недостатки. МКЭ в своей математической формализации более сложен по сравнению с МКР, требует решения громадных систем линейных уравнений, матрицы коэффициентов-которых при условии анизотропной среды имеют несимметричный относительно главной диагонали вид. Поэтому вычисление волновых полей в горных массивах возможно на мощных ЭВМ. Вместе с тем МКЭ позволяет для каждого конечного элемента задать свой механизм упругого или не упругого деформирования, различные механизмы затухания, тем самым промоделировать колебательный процесс не только в упругой, но и в квазиупругой постановке. В МКЭ гашение паразитных отражений от искусственных границ модели проводится более эффективными средствами и при значительно меньших вычисленных затратах, чем в МКР. Устойчивость вычисленного процесса в МКР возможна при выполнении определенного соотношения между шагом дискретизации по пространству и времени при известных максимальных значениях скоростей распространения упругих колебаний. Данное условие необходимо при использовании явных схем МКР. При этом метод не имеет ограничений на вид исследуемых дифференциальных уравнений;

Рассмотрим кратко итоги применения основных методов математического моделирования.

1. Матричные методы проявили себя универсальным методом анализа процесса формирования сейсмических колебаний ненарушенной углевмещающей толщей с учетом различных механизмов затухания, учетом анизотропии среды. Возможен учет таких факторов как пористость среды, трещинноватость, обводненность.

2. Подходы, основанные на сопряжении решений, позволили на начальных этапах становления шахтной сейсморазведки рассчитывать простейшие модели взаимодействия сейсмических полей с нарушениями.

3. МКР позволяет наиболее адекватно реальности рассчитывать волновые поля на моделях любой сложности, учитывающими степень и характер изменения физико-механических параметров в зо-

нах нарушений. Однако, работая в рамках упругой модели, они не позволяют в полной мере оценить вклад различных механизмов поглощения колебаний. Такие факторы как пористость, трещиноватость, обводненность в комплексе с колебаниями горного давления по-прежнему являются трудно учитываемыми. Методология использования других численных методов в настоящий момент в должной мере не разработана.

4. Остается нерешенной проблема моделирования процесса распространения сейсмических колебаний в нарушенной углевмещающей толще с учетом влияния её физико-механических характеристик, пористости, трещиноватости, обводненности в комплексе с колебаниями горного давления на кинематические и динамические характеристики информативных волновых пакетов. Это позволило бы перевести систему знаний о процессе формирования волновых полей в нарушенном углепородном массиве в принципиально новое качество.

Очевидно, на решение данной проблемы в ближайшие годы будут направлены основные усилия исследователей. На первом этапе наиболее перспективным путем её решения является комплексирование использования метода эффективных модулей упругости [40, 51] и механизма затухания сейсмических колебаний с расстоянием [41]. В перспективе следует разработать методологию, основанную не на упругой модели среды. На данный момент такие исследования проводятся, но, к сожалению, зачастую дают противоречивые результаты (обзор основных подходов в данном направлении приведен в [51]).

Кроме этого, следует сказать еще об одной проблеме. В зоне нарушения, представляющей особый интерес в задачах шахтной сейсморазведки, угленосная толща не является плоскопараллельной средой. Поэтому обычно используемое решение уравнений (3) в плоскости, перпендикулярной плоскости напластования, не может быть представлено в виде двух независимо распространяющихся групп колебаний SH , PV и SV . Двухмерный подход крайне ограничивает возможности предварительного анализа и выбора схемы наблюдения, поскольку плоскость моделирования перпендикулярна плоскости расстановки пунктов возбуждения и сейсмоприемников. Методы, применяемые при обработке результатов моделирования, коренным образом отличаются от методов обработки материалов, полученных на практике (по той же причине, что и в предыдущем пунк-

те) [3]. То, что двумерные модели реализации МКР до настоящего времени не уступили место трехмерным обусловлено только тем, что параметры используемых на практике ЭВМ этого не позволяют.

Таким образом, в данной статье дан краткий анализ итогам применения различных методов математического моделирования в области шахтной сейсморазведки. Проведено сравнение их возможностей и недостатков. Сформулированы проблемы, решение которых позволит перевести систему знаний о процессе формирования волновых полей в нарушенном углепородном массиве в принципиально новое качество, разработать более совершенные критерии прогноза геологических нарушений угольных пластов, которые повысят эффективность и надежность методов шахтной сейсморазведки.

Результаты данной статьи могут быть использованы специалистами в области шахтной сейсморазведки для разработки и усовершенствования теоретических методов анализа горно-геологических условий залегания угольных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров Н. Я., Яковлев Д. В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. - М.: Недра, 1988. - 199 с.
2. Анциферов А.В. Основные задачи шахтной сейсморазведки при прогнозе горно-геологических условий эксплуатации угольных бассейнов // Известия горного института. – Донецк: ДонНТУ. - 2002. - № 3. - С.67 -70.
3. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. - Донецк: ООО “Алан”, 2002. - 312 с.
4. Krey T.C. The cannal waves as a tool of applied geophysics in coal mining // Geophysics. - 1963. - Vol.28, Part. 1. - P.701 - 714.
5. Thomson W.J. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium // Journal of Appl. Phys. - 1950. -Vol.21. - P.89 - 93.
6. Haskell N.D. Radiation pattern of surface waves from point sources in a multilayered medium // Bull. Seism. Soc. Am. - 1965. - Vol. 54, № 1. - P. 377 - 393.
7. Молотков Л.А. О матричных представлениях дисперсионного уравнения для слоистых упругих сред // Записки научных семинаров. - Л.: Ленинградское отделение изд-ва “Наука”. - 1972. - Т.25. - С.116 - 131.

8. Молотков Л.А. О распространении упругих волн в средах, содержащих тонкие плоскопараллельные слои // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. - Л.: изд-во Ленинградского университета. - 1961. - № 5. - С.240 - 280.
9. Молотков Л.А., Смирнова Н.С. Об одном алгоритме определения дисперсионных характеристик затухающих интерференционных волн // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. - Л.: Ленинградское отделение изд-ва "Наука". - 1976. - Вып. 16, С.32 - 40.
10. Dunkin J.W. Computation of modal solution in layered, elastic media at high frequencies // Bull. Seismol. Soc. America. - 1965. - Vol.55, № 2. - P.335 - 358.
11. Abo-Zena A. Dispersion function computations for unlimited frequency values // Geophysics J. R. Astr. Soc. - 1979. - № 58. - P.91 - 105.
12. Takeuchi H., Saito M. Seismic surface waves. In: B.A. Bolt (editor), Seismology: Surface waves and Earth Oscillations (methods in Computational Physics, Vol.11) New York: Academic Press, 1972.
13. Данилов В.Н., Вартанов А.З. Исследование кинематических характеристик каналовых волн Лява в плоскопараллельном и криволинейном упругих волноводах // Комплексные исследования физических свойств горных пород и процессов горного производства. - М.: МГИ, 1984. - С. 9 - 13.
14. Ямшиков В.С., Данилов В.Н., Вартанов А.З. Особенности характеристик каналовых волн Лява в многослойном массиве // Известия ВУЗов. Сер.Горный журнал. - 1987. - № 2. - С.4 - 6.
15. Азаров Н.Я., Гильберштейн П.Г., Поляков В.К. Корреляция каналовых волн при прогнозировании нарушенности угольных пластов методом сеймопросвечивания // Прикладная геофизика. - М.: Недра, 1982. - Вып.104. - С.38 - 43.
16. Азаров Н.Я., Жулябин В.И., Слепцов В.А. Теоретические основы и методика выделения зон утонения угольного пласта // Исследование и совершенствование способов, средств осушения и очистной выемки шахт Подмосковского бассейна. - Тула: ПНИУИ. - 1980. - Вып.21. - С.33 - 38.
17. Азаров Н.Я. Основные применения интерференционных волн при прогнозировании геологических нарушений на шахтах Подмосковского бассейна // Геология и разведка угольных месторождений. - Тула: Тульский политехн. ин-т. - 1976. - С.91 - 96.

Прогноз и управление состоянием горного массива

18. Азаров Н.Я., Гильберштейн П.Г., Фрейнкман М.Г. Использование метода межскважинного сейсмоакустического просвечивания для прогнозирования строения угольного пласта // *Технология и техника очистных и осушительных работ на перспективных месторождениях Подмосковского бассейна*. - Тула: ИГД им.А.А.Скочинского. - 1978. - Вып.20. - С.82 - 88.
19. Азаров Н.Я., Поляков В.К. Интерференционные явления и их использование для прогнозирования нарушенности угольных пластов // *Комплексное исследование физических свойств горных пород и процессов*. - М.: МГИ. - 1977. - Ч.1. - С.64 - 65.
20. Азаров Н.Я., Поляков В.К. Основные особенности регистрации и возбуждения сейсмических сигналов в горных выработках // *Вестник МГУ. Сер. Геология*. - 1978. - №3. - С.126 - 128.
21. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы: Пер. с англ. - М.: Мир, 1983. - Т.2. - 360 с.
22. Gilbert J., Backus G. Propagator matrices in elastic wave and vibration problems // *Geophysics*. - 1966. - Vol.31. - P.326 - 332.
23. Menke W. Comment on Dispersion function computations for unlimited frequency values by Anas Abo-Zena // *Geophysics J. R. Astr. Soc.* - 1979. - № 59. - P.315 - 323.
24. Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Поляков В.К. Прогнозирование обводненных разрывных карстовых нарушений с помощью интерференционных волн // *Исследование и совершенствование способов, средств осушения и очистной выемки шахт Подмосковского бассейна*. - Тула: ИГД им. А.А.Скочинского. - 1980. - С.25 - 32.
25. Анциферов А.В., Исаков В.Ф., Шулицкий П.В. Прогнозирование обводненных нарушений угольного пласта с помощью волн Реллея // *Совершенствование технологии и средств осушения, подготовки и выемки угля на шахтах Подмосковского бассейна*. - Тула: ПНИУИ. - 1982. - С.67 - 75.
26. Вартанов А.З., Данилов В.Н., Сидоров Е.Е. Решение задачи рассеяния каналовых волн на скачкообразном изменении толщины и параметров угольного пласта // *Исследование физических свойств горных пород и процессов горного производства*. - М.: МГИ. - 1984. - С.159 - 162.
27. Ямщиков В.С., Данилов В.Н., Вартанов А.З. Способ определения характеристик нарушений пласта с использованием каналовых

- волн Лява // Изв. ВУЗов. Сер. Горный журнал. – 1986. - № 1. – С.4 - 7.
28. Изучение возможности выбора оптимальных критериев прогноза тектонических нарушений на основе моделирования полного поля упругих колебаний. Разработка математического обеспечения: Отчет о НИР (заключительный) / Укр. филиал ВНИМИ. - № ГР 0189017060; Инв. № 1510. - Донецк, 1991. – 39с.
 29. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. - 2-е изд. - М.: Наука, 1973. - 343 с.
 30. Фоменко Н.Е. Прогнозирование тектонических нарушений методами скважинной и шахтной электроразведки на угольных месторождениях: автореф. дис. д-ра геол.-мин. наук: 04.00.12/МГГА, -М., 1998.
 31. Alterman Z., Karal F.C., 1968, Propagation of elastic waves In layered media by finite-difference methods.-Bull. Seim. Soc. Am.. 58. 367-398.
 32. Boore D.M. Finite-difference methods for seismic wave propagation In heterogeneous materials / Methods In computational physics. 1972, 11, B.A. Balt. ed., Academic Press, Inc.
 33. Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S., Alford R.M. Synthetic Seismograms, a finite-difference approach. - Geophysics, 1976. 41, p.2-27.
 34. Korn M., Stock H. Reflection and Transmission of Love channel Waves at Coal Seam Discontinuitis Computed with A Finite-Difference Method.-J.Geophys.,1982,50,p.171-176.
 35. Kenneth D.Mahrer An empirial study of Instability and Improvement of absorbing boundary conditions for the elastic wave equation.- Geophysics, vol.51, N7.
 36. Aki K.,Lamer K.L. Surface motion of layered medium having an Irregular Interface due to Incident plane SH waves.- J.Geophys. Res.. 1970. 75, p.933-954
 37. Анциферов А.В., Захаров В.Н, Глухов А.А. Комплект программ моделирования процесса распространения сейсмических волн в угленосной толще // Каталог прогр. средств. - М.: ГосФАП, 1991. - № 50910000379.
 38. Анциферов А.В. Конечно - разностный подход моделирования сейсмических колебаний в угленосной толще // Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ. - Вып.35. - 2002. - С.108 - 116.

Прогноз и управление состоянием горного массива

39. Анциферов А.В. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей // Проблеми гірського тиску. - Донецк: ДонНТУ. - 2001. - № 5. - С.5 - 15.
40. Глухов А.А. Математическое моделирование сейсмических полей в задачах шахтной сейсморазведки/ Геотехническая механика, 2004. - №49.- С.87-92.
41. 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.
42. Анциферов А.В. Механизмы формирования волнового поля сейсмических колебаний угленосной толщей // Сб. научн. тр. Национальной горной академии Украины. - Днепропетровск: НГА Украины. - 2002. - № 13. - Т.1. - С.60 - 67.
43. Анциферов А.В., Глухов А.А., Сейсмические волновые поля, регистрируемые на угольных пластах Донбасса при решении задач шахтной сейсморазведки/ Зб. научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ, 2005. - № 23. - С.120 - 128.
44. 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.
45. Анциферов А.В., Глухов А.А., Компанец А.И. Влияние геологических факторов на параметры волновых полей при решении задач шахтной сейсморазведки/ Зб. научных трудов “Проблемы горного давления”. - Донецк: ДонНТУ, 2005. - № 13. - С.68 – 85
46. Анциферов А.В. Анализ особенностей распространения сейсмоакустических сигналов через мульды в задачах шахтной сейсморазведки // Физико-технические проблемы горного производства. - Донецк: ИФГП. - 2002. - Вып.5. - С.28 - 34.
47. Анциферов А.В. Влияние резкости акустических границ на формирование акустического сигнала при применении метода сейсмопросвечивания // Физико-технические проблемы горного производства. - Донецк: ИФГП. - 2001. - Вып.4. - С.55 - 63.
48. Анциферов А.В. Математическое моделирование процесса прохождения сейсмических сигналов через тектонические наруше-

- ния угольного пласта // Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ. - Вып.29. - 2001. - С.90 - 97.
49. Анциферов А.В. Прогноз горно-геологических условий отработки угольных пластов методами шахтной геофизики. - Киев: УкрГГРИ, 2003. - 48с.
 50. Анциферов А.В. Учет характеристик сместителя при прогнозе разрывных тектонических нарушений сейсмоакустическим методом // Сб. научн. тр. Нацио-нального горного университета. - Днепропетровск: НГУ. - 2002. - № 14. - Т.1. - С.100 - 109.
 51. 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.-172с.
 52. Dong Liang-guo, Zhou Zu-yi Gaoxiao dizhi xuebao // Geolog. Journ. China Univ. - 2001. - Vol.7, № 2. - P.189 - 195.
 53. Mithell A.R., Walt R. The finite-element method for partial differential equations. - Wiley, 1976. - 215 p.
 54. Sabadell F. Javier, Seron Francisco J., Badal Jose A parallel laboratory for simulation and visualization of seismic wavefields // Geophys. Prospect. - 2000. - Vol.48, № 3. - P.377 - 398.
 55. Smith W.D. A nonreflecting plane boundary for wave propagation problems.- J.Comp.Phys., 15, 1974, p.492-503.
 56. Komatitsch Dimitri, Barnes Christophe, Tromp Jeroen Simulation of anisotropic wave propagation based upon a spectral element method // Geophysics. - 2000. - Vol.65, № 4. - P.1251 - 1260.