

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»

ВІСТІ
ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ

Всеукраїнський науково-технічний

Журнал гірничого профілю

Виходить 2 рази на рік

Засновано у 1995 році

1'2008

Донецьк - 2008

УДК 622.831.1: 519.216

ШАШЕНКО А.Н., СОЛОДЯНКИН А.В., КОРОЛЬ В.И., ПУСТОВОЙТЕНКО В.П.
(Национальный горный университет)

ПРОГНОЗ СИЛОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Приведен анализ неоднородностей породного массива с позиций моделирования их с помощью акустического метода. Рассмотрены возможные физические модели отражения колебаний и их регистрации в выработке. Обоснован алгоритм моделирования структурных и силовых неоднородностей блока оперативного акустического контроля системы геомеханического мониторинга.

Введение

Безопасная и эффективная эксплуатация горнодобывающего предприятия в современных условиях возможна только при детальном изучении объекта и постоянной обработке и анализе большого объема оперативной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) породного массива, параметрах технологических процессов, данных о развитии работ и т.д. Выполнение перечисленных задач возможно только с использованием автоматизированных систем на основе современной компьютерной техники и соответствующего программно-аппаратного обеспечения.

Характеристика объекта исследований и оценка возможности моделирования неоднородностей различного уровня

Горные породы по условиям их образования и залегания являются гетерогенными. Они содержат структурные неоднородности различных уровней. В зависимости от характерного размера неоднородности для изучения внутренней структуры породного массива требуются различные подходы.

Очень удобно, по разным соображениям, принять в качестве инструмента исследования акустические колебания, имеющие диапазон длин волн, сопоставимый с размером определенного класса неоднородностей [1].

С целью создания локальной системы оперативного контроля, диагностики и прогноза состояния породного массива со случайно распределенными силовыми и структурными дефектами при образовании в нем искусственных полостей (выработок) в общем случае можно выделить три основных типа внутренних неоднородностей в соответствии с их характеристическими размерами.

Микронеоднородной является среда, в которой существуют регулярные структурные организации, представляющие собой равномерную решетку мощного сорбента (угля), с упакованными в ней молекулами газа, либо аналогичные структуры данного уровня. Размер указанных неоднородностей значительно ниже длины акустической волны. В этой связи, исследование их акустическими методами не представляется возможным.

На мезоуровне речь идет о микрослоистых структурах – угольный пласт, вмещающие породы, а также случаи плавного изменения физико-механических свойств породы вдоль некоторого направления. Здесь также имеют место за-

метные статистические изменения основных характеристик в составляющих структуры. Линейные размеры неоднородностей этого уровня соответствуют диапазону длин волн акустических колебаний. Поэтому информация, получаемая путем анализа сигналов в этом диапазоне волн, позволяет производить исследования подобного типа неоднородностей.

К неоднородностям мезоуровня можно отнести также и силовые неоднородности, например, опорное давление - эксплуатационное, связанное с перемещающимся в пространстве забоем очистной выработки, и стационарное, располагающееся у неподвижной границы очистной выработки. Техногенными «источниками» силовых неоднородностей являются также протяженные выработки, камеры, целики и другие возможные объекты, приводящие к возмущению поля напряжений в породном массиве.

К макронеоднородностям относятся внутренние несовершенства, обладающие размерами, сопоставимыми с линейными размерами самого углепородного массива, которые возникли вследствие крупномасштабных тектонических процессов - сбросы, надвиги и т.п. К ним также относится слоистая структура, вызванная естественными процессами образования земной коры. Физико-механические характеристики слагающих слоев существенно различаются между собой. Исследованием этого типа неоднородностей занимается раздел геофизики, основанный на анализе упругих сейсмических колебаний с достаточно большой длиной волны.

Как горный массив в целом, так и его структурные составляющие, обладают ярко выраженной анизотропией. Степень анизотропности среды существенно различается на каждом из рассмотренных выше уровней и определенным образом влияет на поведение породных обнажений. Например, при приближении выработки к зоне влияния геологического нарушения (анизотропия макроуровня) могут возникать нелинейные эффекты, сказывающиеся на пространственном распределении напряжений. Анизотропия мезоуровня должна рассматриваться отдельно для каждого слагающего слоя, поскольку каждый из них может обладать собственной анизотропией, существенно отличающейся от свойств прилегающих слоев.

Проблема добычи полезных ископаемых при наличии возрастающего с глубиной горного давления, в конечном счете, подразумевает необходимость постоянного контроля за состоянием породного массива в окрестности выработки. При существующих глубинах разработки месторождений полезных ископаемых определяющей напряженно-деформированного состояния массива является глубина. Однако, на основную картину формирования НДС, накладываются возмущающие факторы, связанные с естественной гетерогенностью и анизотропией среды. Круг перечисленных факторов расширяется учетом техногенной деятельности при создании искусственных полостей, последовательным их развитием в ходе добычи полезного ископаемого.

Для исследования состояния массива следует рассмотреть распространение в нем акустических колебаний путем последовательного учета вышеперечисленных факторов.

Таким образом, **целью работы** является обоснование функционально необходимого для системы геомеханического мониторинга алгоритма моделирования неоднородностей сложноструктурного породного массива.

Теоретические предпосылки и обоснование схемы моделирования структурных и силовых неоднородностей

При отсутствии предварительных напряжений в среде, вид волнового уравнения описывается формулой:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \ddot{u} = \gamma(\mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r} \in \Omega, \quad (1)$$

с граничными условиями, определяющими функцию смещения и ее нормальную производную на различных участках границы:

$$\begin{aligned} u(\mathbf{r}, t) &= \tilde{u}(\mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r} \in \Gamma_1; \\ q(\mathbf{r}, t) &= \frac{\partial u}{\partial n} = \tilde{q}(\mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r} \in \Gamma_2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma, \quad \Gamma_1 \cap \Gamma_2 = 0.$$

Здесь $\nabla^2 = \sum_{n=1}^N \partial/\partial x_n$, $N = 1, 2, 3$ - дифференциальный оператор Лапласа для

одномерного, двумерного и трехмерного случаев, c - скорость звука в среде, $\gamma(\mathbf{r}, t)$ - заданная функция источника. Функции $\tilde{u}(\mathbf{r}, t)$ и $\tilde{q}(\mathbf{r}, t)$ являются заданными условиями на границе $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$. Производная $\partial u/\partial n$ есть скорость вдоль внешней нормали к границе.

При наличии исходных напряжений в массиве вид волнового уравнения значительно усложняется.

При постановке и решении задачи об изучении структурных и силовых параметров среды в пределах одного слоя к наиболее показательной характеристике материала относят затухание проходящего через него сигнала. Эта характеристика в первую очередь отражает уровень диссипативных потерь. Простота технической реализации измерения затухания обусловила имеющийся на сегодняшний день парк измерительных средств.

На основании [2] можно заключить, что затухание акустических волн в горных породах возникает вследствие рассеяния и дифракции их на структурных неоднородностях породы и вследствие прохождения через зоны концентраций напряжений, которые всегда имеют место в реальных породах. По сути дела речь идет о значительном понижении энергии колебаний в процессе их распространения. Наблюдаемое χ_Σ , (оно же регистрируемое χ_{ann} в условиях конкретной горной выработки) затухание акустических сигналов, распространяющихся в пределах одного – двух слоев, представимо в виде следующих составляющих:

$$\chi_\Sigma = \chi_{ann} = \chi_{HDC} + \chi_{1,2}, \quad (3)$$

где χ_{HDC} определяется уровнем имеющихся напряжений, в том числе зон их концентрации, $\chi_{1,2}$ отражает уровень диссипативных потерь на неоднородностях макро- и мезоуровня.

Таким образом, ясно, что к решению задачи о затухании акустических колебаний в породном массиве, вызванных одновременным наличием в нем структурных и силовых неоднородностей, необходим поэтапный подход. Первый его этап следует начинать с определения НДС в окрестности обнажения, проведенного в массиве и анализа простейших случаев затухания сигналов в средах с различными свойствами.

Для учета факторов, которые оказывают влияние на характеристики распространения упругих колебаний в породном массиве, последовательно рассмотрен ряд физических моделей, поясняющих условия отражения этих колебаний и возможности их регистрации в пределах реальной выработки.

Схема определения координат отражающей поверхности по измеряемым характеристикам принимаемого сигнала составляет классическую задачу локации. Для плоской системы координат в описание местоположения точки на поверхности относительно точки приема входят два значения – величина радиус-вектора r и азимутального угла α (рис. 1).

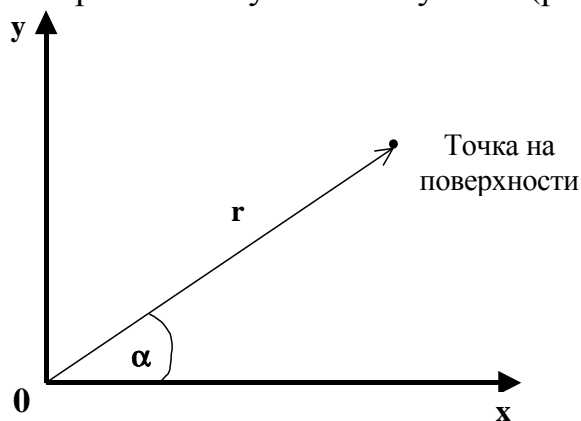


Рис. 1. Описание местоположения точки на поверхности относительно точки приема

Определение r при известных значениях скорости распространения волн в среде осуществляется путем измерения времени прохождения $2r$ расстояния одиночным излучаемым импульсом (дельта-функцией) от излучателя до точки отражения и обратно (к приемнику). Определение угла φ представляет собой достаточно сложную задачу, обычно решаемую путем формирования направленного излучения (ориентации излучателя). Учет реальных факторов, присутствующих в гор-

ной выработке в процессе добычи полезных ископаемых, и подвигание самой выработки не позволяет использовать указанную методику. Тем не менее, определение угла φ может быть осуществлено путем измерения принятого сигнала в двух точках приема с привлечением обычных геометрических зависимостей. Последовательность определения параметров r и φ состоит в измерении времени прохождения сигналов t_1 и t_2 и вычислении: по времени t_1 и известному расстоянию между приемниками L - скорости распространения волн в среде

$C = \frac{L}{t_1}$; расстояния $2r = Ct_2$; расстояния $l = C(t_3 - t_2)$ с последующим опре-

делением угла φ .

Введением дополнительных приемников 2, 3, ... n можно повысить точность измерения r и α . При этом местоположение источника излучения оказывается несущественным. Единственно, накладываемым требованием является излучение генератором сигнала в виде дельта-функции и точная синхронизация приемников.

Переход от плоской задачи к объемной, осуществляется путем добавления к двум приемникам третьего, вынесенного из плоскости XU (рис. 2).

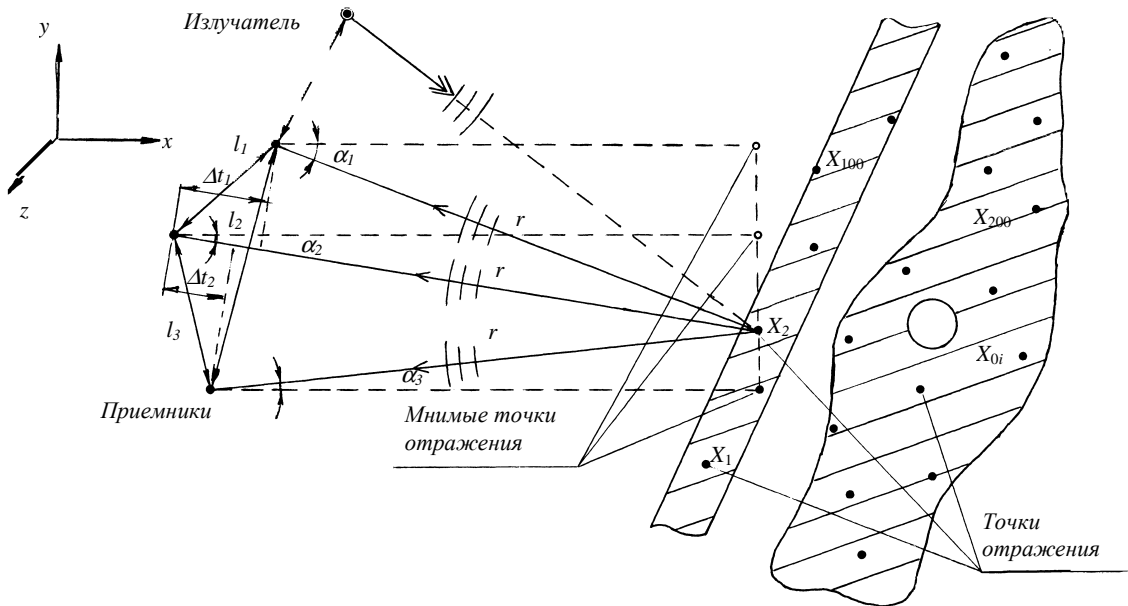


Рис. 2. Описание объемных координат местоположения точек на отражающей поверхности относительно разнесенных в пространстве точек приема

Последовательность определения r и φ остается такой же, однако возрастает количество промежуточных измеряемых параметров $\Delta t_1 \dots \Delta t_n$, $\alpha_1 \dots \alpha_n$, поскольку для вычисления истинных значений $\alpha_1 \dots \alpha_n$ необходимо выполнять промежуточные вычисления расстояний (кратчайших) до мнимых отражателей. Увеличение точек приема повышает точность измерений и одновременно увеличивает количество промежуточных вычислений. Измеряемые параметры образуют матрицы для Δt , φ , C при известных значениях l_1, l_2, \dots, l_n :

$$\Delta t_1 = \begin{vmatrix} \Delta t_{12} & \Delta t_{13} \\ \Delta t_{23} & \Delta t_{34} \\ - & - \end{vmatrix} ; \quad \alpha_{x,y,z} = \begin{vmatrix} \alpha_{1x} & \alpha_{1y} & \alpha_{1z} \\ \alpha_{2x} & \alpha_{2y} & \alpha_{2z} \\ - & - & - \end{vmatrix} ;$$

$$C = \begin{vmatrix} C_{12} & C_{13} \\ C_{23} & C_{34} \\ - & - \end{vmatrix} ; \quad r_{x,y,z} = \begin{vmatrix} r_{1x} & r_{2y} \\ r_{3x} & r_{4y} \\ - & - \end{vmatrix}$$

Для наблюдения за следующей точкой отражения, находящейся на некотором удалении от первой, достаточно внести известную поправку к Δt при неизменности матрицы определения C и рассчитать новые значения $\alpha_{x,y,z}$ и r . Пошаговое изменение временного интервала наблюдения (Δt), достаточно просто выполняемое современным компьютерным обеспечением позволит восстановить пространственное распределение точек отражения на границе раздела сред, т.е. определить образ структурного нарушения в массиве. Показанная схема определения пространственной точки отражения, по сути, относится к

устройству время-импульсного типа. Исходное требование к наличию специального источника, который должен генерировать сигнал специальной формы и синхронизировать приемники информации, в реальных условиях оказывается невыполнимым.

Анализ реальной обстановки, в которой проводится горная выработка, в том числе и ведение очистных работ, показывает, что:

- помеховая акустическая обстановка в массиве при постоянном технологическом воздействии на него не позволяет уверенно регистрировать искусственно генерированные слабые сигналы специального источника;
- установка специального генератора колебаний при постоянном подвигании выработки создаст трудности, которые негативным образом повлияют на технологию проведения основных (добычных) работ;
- специальные требования по энергообеспечению специального источника сигнала, его взрывозащищенности и т.д. будут снижать общий уровень техники безопасности.

Таким образом, показанная время-импульсная схема локации неоднородностей в горном массиве оказывается нецелесообразной.

Другим подходом к решению задачи моделирования структурных и силовых неоднородностей массива с помощью анализа акустических колебаний может быть метод, в основе которого в качестве источника колебаний используется шум от работы самих добычных или других механизмов в шахте.

Сложность анализа такого сигнала с учетом вышесказанного состоит в том, что с одной стороны излучаемая функция остается неизвестной и случайным образом изменяемой во времени, с другой стороны – исключается возможность точной синхронизации приемников информации. В такой постановке вопроса следует изыскивать дополнительные факторы, которыми можно воспользоваться для создания опорных точек отсчета измеряемых параметров. К таким, в первую очередь, можно отнести известное местоположение приемных датчиков. Кроме того, местоположение источника сигнала (при работе комбайна или отбойного молотка) также известно или меняется известным образом.

В данной постановке эта задача в значительной степени похожа на предыдущую, однако при этом отсутствует возможность определения исходных параметров C , t , α за счет синхронизации приемников генераторов колебаний. Такая возможность появится, если в общей структуре шума распознать и тот же сигнал отслеживать. Для ее реализации необходимо привлечение математического аппарата Фурье-анализа и элементов теории распознавания образов.

При разложении акустического сигнала, возникшего в результате работы комбайна, в ряд Фурье

$$F(t) = A_1 (\cos \omega_1 t + \varphi_1) + \dots + A_n (\cos \omega_n t + \varphi_n) \quad (4)$$

возможно выделение одного сигнала (со своей частотой и фазой), использование которого в качестве опорного позволит произвести все показанные ранее вычисления для предыдущей задачи. При этом перечень исходных расчетных параметров остается прежним $t_1 \dots t_n$ (селекция расстояния), $\Delta t_{пр} \dots \Delta t_{прn}$ (селекция α) с добавлением перечня $A_1 \dots A_n$, $\omega_1 \dots \omega_n$, $\varphi_1 \dots \varphi_n$ необходимого для се-

лекции производного сигнала в общей структуре, который принимается в качестве опорного.

Проведение показанного спектрального анализа параллельно с решаемой задачей позволяет решить еще одну – определение степени напряженного состояния исследуемой области породного массива путем определения безразмерного коэффициента

$$k = \frac{A_B}{A_H}, \quad (5)$$

где A_B, A_H – коэффициенты A_1, \dots, A_n ряда (4) соответственно в высоко- и низкочастотных областях спектра акустического сигнала [3]. Коэффициенты отражают величину трассового затухания D и затухание в частотной области сигнала, т.е.

$$\begin{aligned} A_1(\omega_1) &= f(D) \\ A_2(\omega_2) &= f(D, \omega_i), i = 1 \dots n \\ A_n(\omega_n) &= f(D, \omega_n), i = 1 \dots n \end{aligned} \quad (6)$$

Следует отметить, что амплитуда сигнала в точке приема является наиболее удобной и чаще всего используемой при всех видах измерений характеристикой сигнала. При разложении в ряд Фурье показанные значения $A_1 \dots A_n$ также являются амплитудами, однако они принадлежат членам разложения исходной функции и в общем виде определяются суммой

$$A = \sum_{i=1}^n A_i. \quad (7)$$

Функциональные зависимости (7) амплитуд для каждой из составляющих ряда Фурье (4) удобно рассматривать отдельно с точки зрения оценки влияния диссипативных потерь D , возникающих при распространении волны в среде определенной структуры и дисперсии сигнала, которая влияет на коэффициенты отражения и преломления по мере его распространения вдоль слоя.

Алгоритм моделирования структурных и силовых неоднородностей сложноструктурного породного массива

Система геомеханического мониторинга выполняет функции непрерывного контроля, диагностики и прогноза геомеханического состояния породного массива для обоснования технических и технологических решений, выбора рекомендаций по управлению горным давлением и оценки эффективности принятых решений. Составной частью СГМ является подсистема оперативного контроля и прогноза состояния массива, дающего возможность получения информации об имеющихся аномалиях этого состояния непосредственно во время выполнения операций производственного цикла.

Для реализации данной подсистемы необходимо использование надежного метода исследования НДС массива. Один из таких методов и специализированная аппаратура акустического контроля выбросоопасности угольных пластов [3, 4], разработанные в НГУ, в настоящее время являются нормативны-

ми и успешно используются на шахтах Кузбасса, Карагандинского и Донецкого бассейнов.

Реализованный метод и аппаратура акустического контроля состояния горного массива позволяет:

- обнаруживать и заблаговременно предупреждать о возможности возникновения критических ситуаций;
- на основании акустических измерений оперативно оценивать состояние выбросоопасного массива непосредственно при проведении выработок;
- оценивать эффективность противовыбросных мероприятий непосредственно во время их проведения.
- прогнозировать зоны геологических нарушений впереди забоя выработки [5].

Впервые на Украине аппаратура акустического контроля состояния горного массива использовалась в МакНИИ при разработке гибкой технологии отработки особовыбросоопасных пластов и ИГТМ АН Украины при проведении подготовительных выработок по выбросоопасным породам [6].

В результате проведенных работ разработаны технические и технологические решения которые могут быть положены в основу гибких технологических систем безопасной и эффективной выемки угля на выбросоопасных пластах путем регулирования интенсивности воздействия на пласт в зависимости от прогнозируемой степени его выбросоопасности. Другим возможным применением является разработка автоматизированной системы управления проходческим комбайном при проходке выработок в выбросоопасных условиях.

Таким образом, существуют предпосылки создания автоматизированной системы управления технологическим процессом разработки месторождений полезных ископаемых, которая позволит, основываясь на данных оперативного контроля состояния эффективно управлять воздействием на горный массив.

Анализ рассмотренных теоретических и практических предпосылок позволяют обосновать функционально необходимый для системы геомеханического мониторинга и теоретически возможный следующий алгоритм моделирования неоднородностей сложноструктурного массива.

Система акустического контроля включает в себя два контура обработки акустической информации, получаемой из массива при помощи датчиков. Задачей первого контура обработки является выделение прогностического признака оперативной оценки состояния нетронутой области для управления проходческими, добычными или другими механизмами. Задачей второго контура является выделение частных параметров в структуре принимаемых акустических сигналов для обеспечения решения волнового уравнения в системе геомеханического мониторинга. Результатом этого решения должно быть построение карты границ отражающих поверхностей на значительном опережении от обнажения, т.е. локация неоднородностей (структурных и силовых).

Исходя из вышеперечисленных требований, алгоритм обработки акустической информации на уровне системы акустического контроля может быть представлен, как показано на рис. 3.

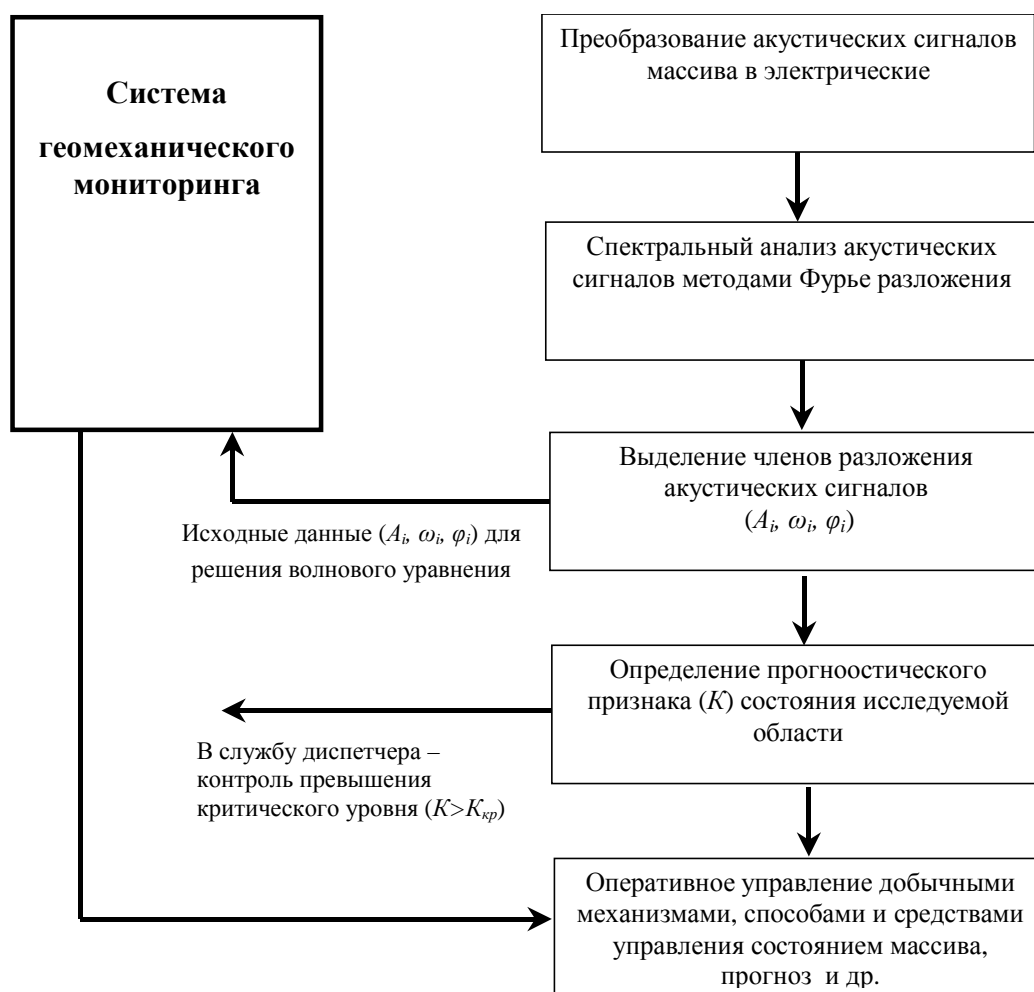


Рис. 3. Алгоритм работы блока акустического контроля системы геомониторинга

Такая система автоматизированного управления станет составной частью системы геомеханического мониторинга и позволит осуществлять управляемые воздействия на горный массив с целью повышения безопасности и увеличения эффективности проведения работ по добыче полезных ископаемых и при эксплуатации подземных объектов различного назначения.

Выводы

1. Исходя из соотношения линейных размеров неоднородностей и диапазона волн акустических колебаний, реальным подходом к решению задачи моделирования структурных и силовых неоднородностей массива может быть метод, в основе которого в качестве источника колебаний используется шум от работы добычных или других механизмов в шахте.

2. Для реализации задачи локации неоднородностей необходимо проведение спектрального анализа принимаемого акустического сигнала с привлечением математического аппарата Фурье-анализа и элементов теории распознавания образов.

3. Разработан алгоритм моделирования структурных и силовых неоднородностей блока акустического контроля включающий в себя два контура обработки акустической информации, получаемой из массива при помощи датчиков. Задачей первого контура является выделение прогностического признака -

критерия выбросоопасности горного массива для управления технологическими механизмами. Задача второго контура - выделение частных параметров в структуре принимаемых акустических сигналов для обеспечения решения волнового уравнения в системе геомеханического мониторинга для построения карты границ отражающих поверхностей в массиве пород (локация структурных и силовых неоднородностей).

Библиографический список:

1. **Ямщиков В.С.** Волновые процессы в массиве горных пород.- М.: Недра, 1984. - 272 с.
2. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах.- М.: Наука, 1973. – 344с.
3. А.с. 1222853 СССР, МКИ E21F 5/00, E21C 39/00. Способ акустического прогноза выбросоопасности угольных пластов и устройство для его осуществления / С.В. Мирер, Е.В. Масленников, О.И. Хмара (СССР). - № 3804593/22; Заявлено 23.10.84; Оpubл. 07.04.86. Бюл. № 13. – 2 с.
4. Спосіб діагностики гірського масиву (Патент на винахід № 43239А Україна, МКИ E 21 F5/00 Спосіб діагностики гірського масиву / О.М.Шашенко, Є.В.Масленніков, заявл.24.04.2001, опубл. 15.11.2001, бюл.№10. – I-II с.).
5. **Шашенко А.Н., Масленников Е.В., Солодянкин А.В., Якимов С.А.** Оперативный прогноз зон геологических нарушений искусственно сформированными акустическими сигналами // Вісник Криворізького технічного університету. –Кривий Ріг: КТУ. – 2006. – Вип. 2 (12). – С. 35-39.
6. **Зорин А.Н., Вдовиченко В.П., Масленников Е.В.** Расширение возможностей акустического метода контроля выбросоопасности углей для оценки напряженного состояния породного массива в окрестности полевой выработки // Сб. науч. тр. НГУ. – Днепропетровск: РИК НГУ. – 2002. - № 15. – Том. 2. – С. 68-74.

© *Шашенко А.Н., Солодянкин А.В., Король В.И., Пустовойтенко В.П., 2008*