

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗНОЙ ДИАГНОСТИКИ И  
ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ  
С УЧЕТОМ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Розглянуто питання по теорії прогнозної діагностики та поточного контролю геомеханічних і геотехнічних об'єктів з урахуванням синергетичних процесів.

**THEORETICAL ASPECTS OF THE FORECAST DIAGNOSTICS AND  
CURRENT CONTROL OF A GEOPHYSICAL MEDIUM  
WITH THE ACCOUNT OF SYNERGETIC.**

The question of the theory of forecast diagnostics and current control of state geomechanical and geotechnical objects with the account of synergetic were investigation.

Проблема эффективности и безопасности угледобычи в сложных горно-геологических и интенсивных горно-технологических условиях непосредственно связана с освоением литосферного ресурса и подземного пространства и представляет собой крупную научно-техническую и важную народно-хозяйственную задачу. В связи с этим в настоящее время, как никогда раньше, встала проблема определения направлений экспериментальных и аналитических исследований с целью развития теории познания геомеханических процессов в новых условиях эксплуатации угольных шахт. Научно-техническую парадигму изучения геомеханических процессов при отработке угольных пластов можно сформулировать следующим образом: диагностика, контроль, прогноз состояния угленосного массива.

Проведенный анализ работ отечественных и зарубежных исследователей позволил систематизировать представления об объектах геофизической информации, которая может быть основополагающей при разработке оперативного мониторинга состояния сложноструктурных геотехнических систем.

Классификация геомеханических систем по их функциональному назначению дает возможность оценить наиболее общую направленность и последствия процессов взаимодействия между технологическими и геологическими факторами.

Одна из специфических особенностей геосистем состоит в их способности самоорганизовываться под действием процессов, происходящих в окружающем пространстве. Эта способность геосистем подпадает под понятие "синергетика", впервые введенное Г. Хакеном 20 лет назад и изучающее эволюцию сложных неравновесных природных систем [1].

При проведении исследований состояния геологической или геофизической среды возникает необходимость принятия той или иной модели. Для реализации модельно-целевого подхода к исследуемым геомеханическим системам в иерархию объектов исследования включены только те, которые представляют интерес при проведении геологоразведочных и горных работ как объектов геофизического мониторинга. При дифференциации можно выделить несколько масштабных уровней геомеханических систем, характеризующихся определенными закономерностями изменения физических величин.

Наличие структуры в горном массиве отмечено давно, но структурные элементы являются лишь следствием деформационного самоорганизующегося процесса, а для геомеханики структура породного массива важна как форма организации, упорядочения твердой среды. Изучение различных структур литосферы как форм самоорганизации геофизической среды позволит получить наиболее объективную информацию о свойствах и состоянии породного массива, сложных геомеханических систем и устойчивости подземных сооружений [2].

На примере решения двух задач проанализирован характер изменения литолого-геомеханических особенностей продуктивных тощ, приводящих к развитию синергетических процессов, и дана теоретическая и методическая база их геофизического контроля.

С целью выявления особенностей и уточнения механизма процессов самоорганизации породного массива, ослабленного горной выработкой, рассмотрим выработку цилиндрической формы радиусом  $r = R_0$ , расположенную в трещиноватом массиве горных пород на глубине  $H$ . Ось выработки параллельна свободной поверхности.

Для определения характера распределения напряжений вокруг горной выработки круглого сечения в упругой постановке с использованием решения задачи Кирша и метода суперпозиции напряжений получено решение для определения радиальных, тангенциальных и касательных напряжений в окрестности горной выработки. Принято, что по вертикальной оси  $Y$  действуют сжимающие напряжения  $\gamma H$ , а по горизонтальной оси  $X$  – сжимающие напряжения  $\lambda \gamma H$ , где  $\lambda$  – коэффициент бокового распора:

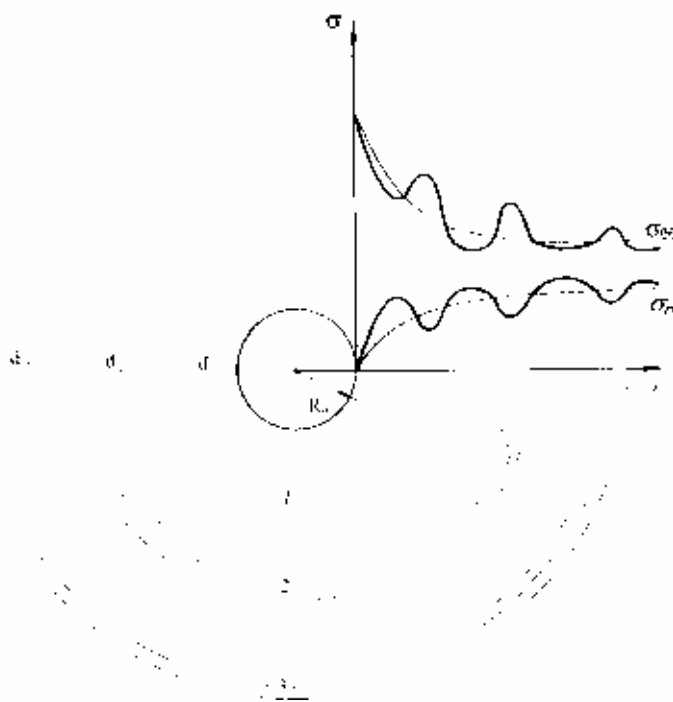
$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= -\frac{\gamma H}{2} \left[ (1 + \lambda) \left( 1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) + (1 - \lambda) \left( 1 - \frac{4R_0^2}{r^2} + 3 \frac{R_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right], \\ \sigma_{\theta\theta} &= -\frac{\gamma H}{2} \left[ (1 + \lambda) \left( 1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) + \left( 1 + 3 \frac{R_0^4}{r^4} \right) (1 - \lambda) \cos 2\theta \right], \\ \sigma_{r\theta} &= -\frac{\gamma H}{2} (1 - \lambda) \left( 1 + \frac{2R_0^2}{r^2} - 3 \frac{R_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\theta$  – полярный угол.

Учитывая трещиноватость породного массива, в котором расположена горная выработка, проанализируем полученное решение.

Под воздействием давления  $\gamma H$  стенки полости выработки будут перемещаться вовнутрь. Поэтому у стенок полости горная порода будет сжиматься под воздействием тангенциальных составляющих напряжений  $\sigma_{\theta\theta}$ , величина которых достигает максимальных значений на стенках полости. Радиальные компоненты напряжений  $\sigma_{rr}$  вблизи стенок цилиндрической полости достигают минимальных значений и возрастают по мере удаления от контура выработки до значений, обусловленных величиной горного давления в нетронутом массиве.

ве. В таком поле напряжений у стенок полости начинают расти тангенциальные трещины, образуя зону разгрузки, в которой радиальные компоненты напряжений  $\sigma_{rr}$  минимальны, а тангенциальные  $\sigma_{\theta\theta}$  – максимальны (зона 1 на рис. 1). Количество тангенциальных трещин с увеличением расстояния от контура выработки  $r$  будет уменьшаться вследствие уменьшения тангенциальных компонент напряжений  $\sigma_{\theta\theta}$  ( $\sigma_{\theta\theta} \sim \frac{A}{r^n}$ ,  $n \geq 2$ ). В этом случае вокруг цилиндрической полости формируется опорный слой породы  $d_1$ , который и обеспечивает устойчивость выработки [3].



$d_1, d_2, d_3$  – размеры опорных породных слоев; 1, 2, 3 – трещиноватые зоны

Рис. 1. Распределение напряжений вокруг выработки

Рассмотрим теперь эффективную цилиндрическую поверхность радиусом  $R = R_1$ , где  $R_1 = R_0 + d_1$ . На стенки этой эффективной полости действуют напряжения  $\sigma_{rr} < \gamma H$  и сжимающие напряжения  $\sigma_{\theta\theta} > \gamma H$ , в поле которых растут тангенциальные трещины (зона 2, рис. 1). Трещины разгружают массив, и при наложении  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{\theta\theta}$  формируется второй опорный слой толщиной  $d_2$  (рис. 1).

Получаем снова цилиндрическую поверхность, аналогичную поверхности, образуемой стенками горизонтальной выработки в поле сжимающих напряжений, и так далее, т.е. происходит процесс с образованием подобных структур, так называемых фракталов, в результате чего возникает квазистационарная волна напряжений в массиве вокруг образовавшейся полости, которая, с учетом экспериментальных данных, полученных в работе [4] для условий шахты им.

Героев космоса, принимает вид:  $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\left(\alpha r + \frac{t}{\tau}\right)\right) \cos \frac{\pi}{2R_0} r$ , где  $\sigma_0$  – начальные напряжения на контуре выработки;  $r$  – расстояние от контура выработки вглубь массива;  $\alpha$  – коэффициент затухания квазистационарной волны.

Изложенное выше дает возможность для трансформации выражения (1), позволяющей учитывать развитие трещиноватости вокруг выработки путем замены  $R_0$  на  $R_0 + nd_i$ , где  $n$  – номер трещиноватой зоны, считая от контура выработки.

С целью выявления в геомеханических системах участков, нуждающихся в первоочередной прогнозной диагностике и текущем контроле, на основе математического моделирования исследованы особенности формирования нагрузки на крепь с учетом устойчивости пород кровли. Разработан метод расчета нагрузки на крепь, учитывающий идентичность гравитационных сил гибкой нити и горного давления, который позволяет учитывать глубину заложения выработок, угол падения обрабатываемых пластов, физико-механические свойства пород и параметры месторасположения выработок. Предложенный подход служит основой для разработки рекомендаций по выбору оптимальных мест установки измерительных станций.

Таким образом, на основе исследований влияния горного давления на формирование свода обрушения в породах различной устойчивости обоснован механизм процессов самоорганизации породного массива, заключающийся в том, что в результате воздействия геологических и техногенных факторов происходит переход массива из одного квазистационарного равновесного состояния с минимальной потенциальной энергией в другое. Геомеханические процессы, сопровождающие этот переход, носят волновой затухающий характер.

Зная характер распределения величины горного давления, а также закономерности протекания синергетических процессов вокруг горной выработки, можно прогнозировать опасные по обрушению во времени и пространстве области в массиве горных пород.

Для развития и усовершенствования геофизического мониторинга состояния подземных сооружений и углепородного массива выполнены теоретические исследования волновых и синергетических процессов, резонансных явлений и особенностей формирования физических полей в различных геомеханических структурах.

Исследованы резонансные явления в различных плоскопараллельных структурах массива горных пород на основе динамического подхода и установлено, что условия возникновения резонансных явлений в плоскопараллельных структурах определяются соотношением начальных напряжений в массиве, его упругими свойствами, мощностью пласта или отслоения, а также степенью трещиноватости пород. С уменьшением степени свободы отслоений участков кровли горных выработок наблюдается тенденция к возрастанию частоты их собственных колебаний по параболическому закону и уменьшению статического прогиба и возникающих при этом напряжений по гиперболическому, что

свидетельствует об увеличении устойчивости кровли. При увеличении скорости динамических воздействий на кровлю ее устойчивость снижается.

Так как метод виброакустического контроля не дает возможности получить интегральные характеристики массива, то с учетом особенностей горной геофизики разработаны теоретические основы электрометрического контроля состояния плоскопараллельных породных структур. Получена аналитически связь между кажущимся электрическим сопротивлением горных пород или любого другого объекта геотехнических систем и их влажностью, пористостью, механическим напряжением, деформационными параметрами, а значит и трещиноватостью среды.

Такой теоретический подход позволяет оценить основные влияющие факторы на электрическое сопротивление геоматериалов при отработке методики их диагностики в различных условиях.

Для горных пород различной степени влажности с учетом начальных напряжений в породном массиве, при условии некоторых допущений, получены следующие выражения для определения удельного электрического сопротивления для слоев горных пород с коэффициентом водонасыщения, меньшим 0,8:

$$\rho_i = \frac{\sqrt{6}\rho_c^{1/2}\rho_e^{1/2}\left(1 \pm \frac{\sigma_{jj}^0}{3K}\right)^{3/2}}{\pi\left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{E}\right)^2 W_e^{1/2}\gamma_1^{1/2}}, \quad (2)$$

а для горных пород с коэффициентом водонасыщения, большим 0,8 –

$$\rho_i = \frac{1,12\rho_c^{1/2}\rho_e^{1/2}\left(1 \pm \frac{\sigma_{jj}^0}{3K}\right)^{3/2}}{\sqrt{\pi}\left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{E}\right)^2 m_0^{1/2}}, \quad (3)$$

где  $\rho_e$ ,  $\rho_c$  – удельные электрические сопротивления воды в порах и минерального скелета соответственно;  $W_e$  – влажность горных пород на единицу сухой массы в долях единицы;  $\gamma_1$  – отношение удельного веса горных пород к удельному весу воды;  $m_0$  – пористость горных пород; (по индексу  $i$  нет суммирования).

Из полученного решения следует, что на величину удельного электрического сопротивления оказывают влияние как объемное напряженное состояние, так и величина напряжений, действующих в направлении, в котором производятся замеры.

С целью выявления зависимости удельного электрического сопротивления от открытой пористости или трещиноватости рассмотрим геосреду как систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Так как выражения, полученные при точном решении задачи, весьма громоздки, то, приняв ряд допущений, получено уравнение:

$$\rho_{ni} = \left( \frac{1 - m_n}{\rho_n} - \frac{m_n^2 (1 - m_n)^3}{\rho_g} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где:  $\rho_n$  – удельное электрическое сопротивление ненарушенного горного массива;  $m_n$  – открытая пористость или степень трещиноватости исследуемого участка.

Из приведенного уравнения следует, что зависимость удельного электрического сопротивления среды от пористости изменяется по гиперболическому закону, что совпадает с результатами экспериментальных исследований (рис. 2).

Таким образом, на величину удельного электрического сопротивления слоистых горных пород оказывает влияние как объемное напряженное состояние, так и величина механических напряжений, действующих в направлении проведения измерения; причем минимальные значения удельного электрического сопротивления наблюдаются при нагрузке, близкой к разрушающей. Характер изменения удельного электрического сопротивления от нагружения аппроксимируется параболической зависимостью, от температуры – линейной, от влажности и пористости – гиперболической. Распределение величины удельного электрического сопротивления вокруг выработок подтверждает волновой характер геомеханических процессов.

Изложенный теоретический подход позволяет оценить основные влияющие факторы на электрическое сопротивление горных пород и грунтов при отработке методики их диагностики в различных условиях и доказать волновой характер распределения зон повышенной трещиноватости вокруг выработок.

Информация о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород дает фундаментальное представление о важнейших геолого-геомеханических процессах, протекающих в земной коре, о размещении месторождений полезных ископаемых, она необходима также и при проектировании, строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий и подземных сооружений. В этой связи разработка теоретических основ геофизической диагностики напряженно-деформированного состояния весьма актуальна.

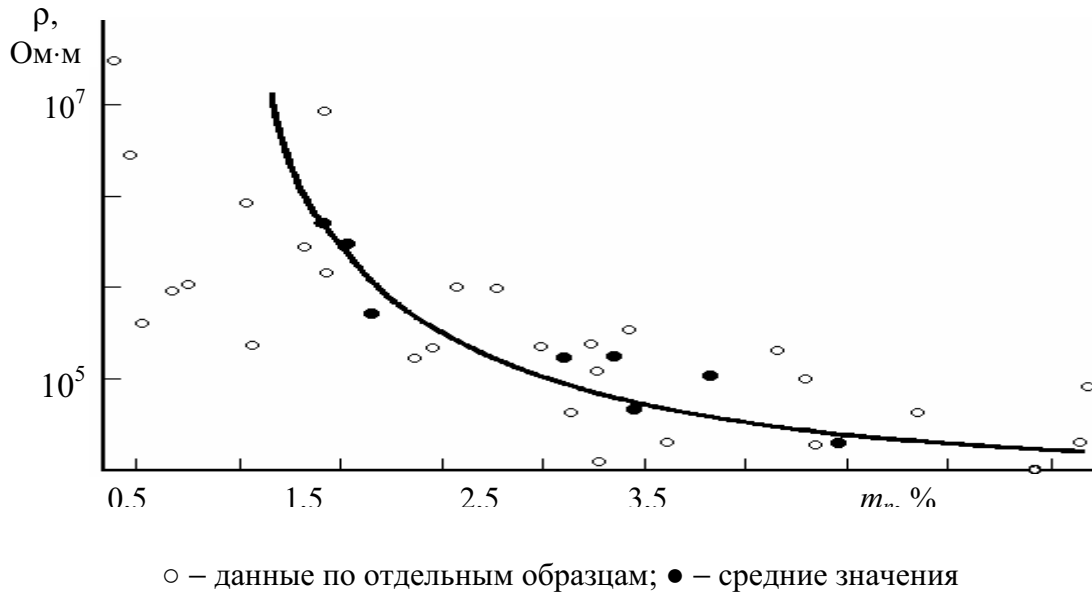


Рис. 2. - Зависимость удельного электрического сопротивления интрузивных и эффузивных пород от пористости

С целью изучения возможностей акустических методов для диагностики напряженного состояния массива горных пород решены уравнения движения с учетом физической и геометрической нелинейности среды и получены выражения для определения скоростей, коэффициентов затухания и сдвига фаз акустических волн в слоистой, пористой (или трещиноватой) среде, из которых следует, что рост напряжений до значений, не превышающих предела прочности пород, приводит к увеличению скоростей акустических волн и уменьшению их коэффициентов затухания (рис. 3).

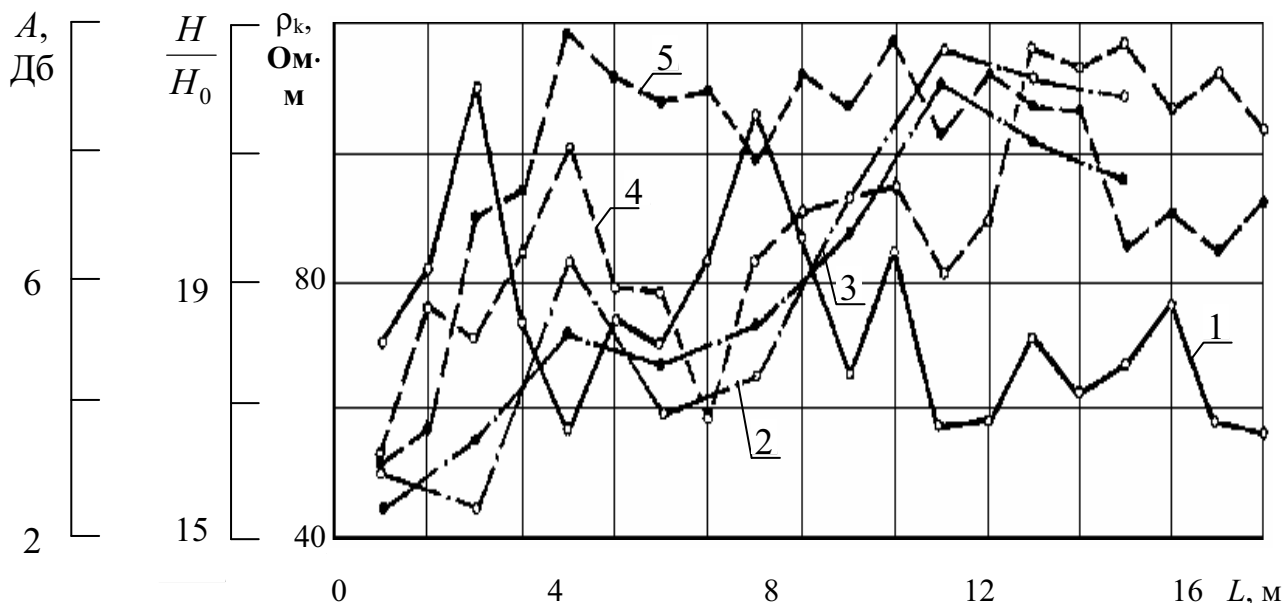
Для скоростей  $V_{s_j}$  и коэффициентов затухания  $\alpha_{s_j}$  поперечных волн, распространяющихся перпендикулярно слоистости в пористой среде, в первом приближении получены следующие выражения:

$$V_{S_{zj}} = \left( \frac{\lambda_s \left( 1 \pm \frac{\sigma_{jj}^0}{3K} \right) (1 + \omega^2 \tau_{s_5}^2)}{\bar{\rho}} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\rho_1}{\bar{\rho}} (1 - k_n) \omega^2 \tau_{s_5}^2 \right);$$

$$\alpha_{S_{zj}} = \left( \frac{\bar{\rho}}{\lambda_s \left( 1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{3K} \right) (1 + \omega^2 \tau_{s_5}^2)} \right)^{1/2} \frac{\omega^2 \tau_{s_5}}{2} \left( \frac{\rho_1}{\bar{\rho}} (1 - k_n) - 1 \right), \quad (5)$$

где  $\lambda_s$  – модуль упругости трансверсально-изотропной среды;  $\bar{\rho}$  – средняя плотность среды;  $\rho_1$  – плотность непористой фазы;  $k_n$  – пористость среды;  $\tau_{s_5}$  –

время релаксации;  $\omega$  – частота упругой волны;  $j$  – направление поляризации поперечной волны.



1 - зависимость уровня электромагнитной эмиссии  $H$ , отн. единицы; 2, 3 – зависимость кажущегося сопротивления  $\rho_k$  на расстоянии 2 м от контура выработки и среднее по длине шпура, соответственно, Ом·м; 4, 5 – зависимость амплитуды колебаний крепи  $A$  с правой и левой стороны выработки, соответственно, Дб

Рис. 3 - Характер изменения геофизических параметров в районе сопряжения горизонтальной выработки с вертикальным стволом по мере удаления от него

Установлено, что параметры поперечных акустических волн оказываются более чувствительными к нагрузке не только в направлении распространения волны, но и в направлении ее поляризации, а явление дисперсии акустических волн при их распространении в слоистой пористой (трещиноватой) среде проявляется в нелинейной зависимости коэффициентов затухания от частоты.

Предложено теоретическое обоснование диагностики физико-механических свойств и напряженного состояния осадочных горных пород путем использования динамических и кинематических характеристик акустических и электромагнитных полей. Получено уравнение, позволяющее оценивать величину действующих напряжений в сейсмoeлектрически активном слоистом массиве по упругим и электрическим параметрам исследуемой среды и отношению энергий акустического и электромагнитного излучений, которое с учетом затухающего волнового характера геомеханических процессов вокруг горных выработок записывается следующим образом:

$$\sigma_{33}^0 = 3K \left( \frac{b_1 V_p \rho^{1/2} \epsilon^*}{a_1 d_1 (\epsilon \epsilon_0)^{1/2}} \sqrt{\frac{W_E}{W_u}} \mp 1 \right) \exp \left( - \left( \alpha r + \frac{t}{\tau} \right) \right) \cos \frac{\pi}{2R_0} r =$$



$$= 3K \left( \frac{W_E (\lambda_1 b_1 - d_1^2)^2 \varepsilon^{*2}}{W_u a_1^2 d_1^2 \lambda_1 \varepsilon \varepsilon_0} \mp 1 \right) \exp \left( - \left( \alpha r + \frac{t}{\tau} \right) \right) \cos \frac{\pi}{2R_0} r, \quad (6)$$

где  $a_1, b_1, d_1$  – электрические параметры исследуемой среды;  $W_u, W_E$  – плотности энергий акустических и электромагнитных излучений;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon^*$  – относительная деформация.

Таким образом, соотношение динамических и кинематических параметров акустических и электромагнитных полей, возникающих в процессе деформирования массива горных пород, внешних воздействий и синергетических эффектов, является информативным показателем, характеризующим изменение напряженно-деформированного состояния породного массива в пространственно-временном континууме и наиболее вероятное направление высвобождения внутренней энергии, что составляет базу для количественной оценки результатов геофизического мониторинга.

Теоретические исследования позволили выявить наиболее информативные параметры методов геофизического контроля различных структурных неоднородностей в породных массивах, направлений преимущественной ориентации зон повышенной трещиноватости, а также для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива и прогноза изменения его во времени и пространстве.

С целью проверки и апробации результатов теоретических исследований совместно с докт. техн. наук В.В. Левитом [5] и сотрудниками отдела механики горных пород Института геотехнической механики НАН Украины выполнен комплекс натурных исследований на участке сопряжения ствола с горизонтальной выработкой в условиях шахт Донбасса на больших глубинах. Результаты измерений, полученные с помощью электрометрического, виброакустического методов и метода естественного излучения электромагнитного поля Земли, подтверждают волновую природу распределения зон повышенной трещиноватости вблизи горных выработок и возникновение синергетических процессов при ведении горных работ.

Совокупность полученных теоретических разработок использована при создании методических основ геофизического мониторинга различных структурных неоднородностей в углепородном массиве, отслоений пород в кровле и боках горных выработок, а также направлений преимущественной ориентации зон повышенной трещиноватости, зон концентрации напряжений и процессов самоорганизации породного массива, что представляет собой достаточную базу для создания научно-технических принципов диагностики геомеханического состояния породного массива и горнотехнических сооружений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 381 с.
2. Усаченко Б.М., Паламарчук Т.А., Слащева Е.А. Исследование синергетических и волновых процессов в массиве горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГУ. – 2000. – № 8. – С. 182-184.

3. Паламарчук Т.А. Особенности и теоретические предпосылки контроля процессов самоорганизации породного массива, ослабленного горной выработкой // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 2000. – №23. – С. 156-159.

4. Усаченко Б.М., Кириченко В.Я., Шмиголь А.В. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1992. – 168 с.

5. Синергетические эффекты и волновая природа геомеханических процессов в углеродном массиве / Б.М. Усаченко, А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, В.В. Левит // Сб. науч. тр. НГАУ. – Днепропетровск: НГАУ. – 1998. – № 3. – Т. 3. – С. 58-61.

**УДК 622.831**

В.М. Сергієнко

## **МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОЇ АПАРАТУРИ З ОЦІНКОЮ ТРИВАЛОСТІ ПАКЕТА ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ**

Доказано, что в зонах пустот под плитой процесс свободных колебаний является более продолжительным. Представлены технические характеристики разработок автора для выявления пустот. Предложены направления совершенствования аппаратуры.

## **OPPORTUNITIES AND PROSPECTS OF UPGRADING VIBRATING-SONIC EQUIPMENT WITH AN ESTIMATION OF DURATION OF A TRAIN OF FREE OSCILLATIONS**

It is proved that in zones of interstice under a slab the process of free oscillations is longer. The performance attributes of author's developments for adjectives interstice are presented. The lines of upgrading of equipment are proposed.

Віброакустичний метод діагностики стану масивних конструкцій з бетону чи природного матеріалу знайшов нині широке застосування в гірничій справі, гідромеліорації, транспортному будівництві [1]. Найбільш поширеним є варіант методу з одноразовим ударним збудженням досліджуваної ділянки об'єкта та аналізом параметрів її вільних коливань. Принцип роботи переважної більшості розробок полягає в визначенні спектральних складових пакета вільних коливань («Поиск», «Прогноз», «Спектр», «Резонанс», «ИСК»). Автором послідовно проводиться розробка віброакустичної апаратури дещо іншого напрямку – з використанням в якості інформативного параметра тривалості процесу вільних коливань. На можливість такого підходу було вказано ще одним із засновників віброакустичного методу Монтілем [2], а також в роботах [3, 4],

Найпростіша математична модель для обґрунтування розробок вказаного напрямку являє собою тонку плиту з пружним защемленням по довгих сторонах (напрямок ОХ) та вільними короткими сторонами (напрямок ОУ). Аналітичний запис граничних умов для довгої сторони а:

$$\begin{cases} \omega + \alpha Q = 0 \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} + \beta M = 0 \end{cases} \quad (1)$$