

Д-р техн. наук Б.М. Усаченко
д-р техн. наук Т.А. Паламарчук
(ИГТМ НАН Украины)

**МЕХАНОСИНЕРГЕТИКА – ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА
В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ
И УПРАВЛЕНИИ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ**

Розглянуто деякі питання механосинергетики як фундаментальної бази при дослідженні стану породного масиву і керування гірським тиском.

**MECHANOSYNERGATIC – FUNDAMENTAL BASE
BY INVESTIGATIONS OF MASSIF'S STATE
AND OPERATION OF MINING PRESSURE**

Certain questions of as fundamental base by investigation of massif's state and operation of mining pressure.

Положение, сложившееся сейчас в области изучения породных массивов и горного давления, требует решения ряда проблем на стыке горных наук, геофизики и инженерной геологии. Решение проблем, возникающих на стыке смежных наук, возможно, как правило, нетрадиционными методами. И одним из таких методов изучения геосистем может быть синергетический [1]. Признаком того, что геологические системы подчиняются принципам синергетики, являются их открытость, диссипативность и нелинейность.

Известно, что горные породы характеризуются высокой степенью неоднородности, наличием больших и малых блоков, различных систем трещин. Учет этих особенностей, присущих геологической среде, обеспечивает повышение достоверности теоретических и прикладных решений в задачах освоения недр.

Другой весьма важной задачей является изучение проявлений горного давления.

Полученные интересные данные о распределении естественных напряжений поставили под сомнение правомерность геостатических гипотез Гейма, Динника и др. и подтвердили предположение, что взаимодействие подземных выработок с геологической средой определяется не только гравитацией, а также сложным и неоднозначным характером распределения напряжений в массиве пород. Так, в скальных массивах с достаточно высоким уровнем напряжений обнаружена значительная неоднородность поля естественных напряжений, в зонах тектонических нарушений уменьшение величины напряжений, а вблизи склонов и в местах влияния крупных разрывных нарушений обнаружены зоны с относительно высокой концентрацией напряжений [1].

Изучение напряженного состояния массивов горных пород выявило заметное превышение горизонтальных составляющих действующих напряжений над вертикальными [1, 2]. Однако найти этому явлению убедительное объяснение до настоящего времени не удавалось. Расширение географии и методов изучения напряженного состояния не привело еще к однозначному объяснению при-

чин аномальности в значениях напряжений, их изменчивости, проявлении закономерностей.

Аномалии в поведении массивов горных пород при взаимодействии с подземными сооружениями явились основанием для поиска принципиально новых путей при исследованиях геологической среды и взаимодействия с ней подземных сооружений в течение длительного эксплуатационного периода [1]. Возникла необходимость в определении роли геологической среды при использовании подземного пространства и охране этой среды, т.е. в выявлении своеобразной роли литосферы.

Массив горных пород, который относится к активным средам, характеризуется непрерывным рассредоточенным притоком энергии от внешнего источника и ее диссипацией. Благодаря тому, что через каждый физически малый элемент среды протекает поток энергии от источника к термостату, этот элемент выводится из состояния теплового равновесия и приобретает способность совершать автоколебания, быть бистабильным либо возбудимым. Когда отдельные такие элементы локально связаны между собой и формируют распределенную активную среду, в подобной среде наблюдаются различные стационарные или зависящие от времени пространственные структуры. Эти процессы лежат в основе явлений самоорганизации в геосистеме [3].

Таким образом, одна из специфических особенностей геосистем состоит в их способности самоорганизовываться (самоконструироваться) под действием энергии процессов, происходящих на Земле [4]. Вопрос о самоорганизации открытых природных систем, охватывающих живую и неживую природу, в том числе и геосистемы, вытекает из второго закона термодинамики. Процесс самоорганизации геосистем относится к эволюционным: движение геологических тел не подчиняется каким-либо регуляторам и происходит с наименьшей затратой энергии. Поэтому при самоорганизации сохраняется и функционирует структура геологических сред (выгодная для адаптации и выполнения функции породных конструкций), вступающих в "работу" и определяющих их когерентное поведение при флуктуирующих состояниях геосистем. Эта способность геосистем подпадает под понятие "синергетика", впервые введенное Г. Хакеном 20 лет назад [4] и изучающее эволюцию сложных неравновесных природных систем, переход их от хаоса к порядку вследствие самоорганизации (коллективных, кооперативных взаимодействий отдельных сложных систем) [5]. Обычно элементы, из которых состоит физическая система, являются пассивными – для каждого из них, как и для всей системы в целом, существует выделенное равновесное состояние с минимумом энергии. Достигнув этого состояния, система уже не способна самостоятельно его покинуть [1].

В рамках синергетики исследуются процессы в отдельных частях неупорядоченных систем, вследствие чего происходит самоорганизация, обуславливающая возникновение пространственных макроскопических структур как результат кооперативного действия элементов разных уровней. Подобным кооперативным действием можно, в частности, объяснить устойчивость многих неза-

крепленных горных выработок, поведение которых противоречит существующим гипотезам горного давления [1, 6]. Элементарные блоки и структурно-тектонические блоки низкого порядка адаптируются к созданным условиям благодаря совместному действию – перемещению внутрь выработки, заклиниванию и т. д.

Массивы горных пород в горноскладчатых областях можно рассматривать как неравновесную область геологического пространства с нелинейными свойствами (например, отсутствие линейной связи геостатических напряжений с глубиной, изменчивость свойств пород), постоянно стремящуюся к упорядоченности под влиянием градиентов неравновесности. Таким образом, неравновесность геосистем служит постоянным источником их упорядоченности.

В неравновесных условиях в массивах горных пород формируются качественно новые состояния за счет создания диссипативных структур, когерентного поведения породных конструкций, аккумулирующих в своих элементах высокие значения напряжений, в том числе их горизонтальной составляющей. Наличие зон относительно высокой концентрации напряжений и одновременно локальные снижения напряжений, концентрация высоких напряжений вблизи склонов и вокруг подземных выработок, приуроченность их к границам структурно-тектонических блоков и крупных тектонических нарушений свидетельствуют о сложном, но весьма «конструктивном» распределении напряжений в массиве горных пород как в естественной породной конструкции. Поэтому для успешного анализа результатов исследований напряженного состояния горных пород, для выявления пространственного положения тензора напряжений, отражающего естественные и техногенные изменения в состоянии геологической среды, необходимо изучить пространственную изменчивость полей напряжений. Это позволит выявить диссипативные структуры в массивах горных пород и объяснить неравновесность их напряженного состояния.

Явление самоорганизации присуще не только геосистемам, а носит всеобъемлющий характер и имеет место на фоне общей кинематики любого деформируемого тела между объемами, характеризующимися степенью реализации законов, появляющихся в движении, в частности законов упругости и пластичности. Применительно к механике твердого деформируемого тела, реологии, теории обработки материалов давлением и резанием выделяются очаги деформации и переходные области, устанавливаются связи между ними [7].

Применяемое для оценки свойств и состояния массива керновое бурение и механические методы контроля геомеханических систем и сооружений весьма трудоемки и требуют для повышения надежности полученных результатов значительного увеличения плотности сетки скважин, что приводит к увеличению затрат материальных и человеческих ресурсов. С точки зрения оперативности и информативности контроль напряженно-деформированного состояния массива и системы крепь-массив, а также устойчивости подземных сооружений должен базироваться на оперативных методах горной геофизики.

С целью создания методологической базы геофизического мониторинга и

прогнозной диагностики напряженно-деформированного состояния углепородного массива выполнены теоретические исследования по обоснованию информативности геофизического контроля состояния сложно-структурного породного массива, в котором проявляются синергетические эффекты.

При изучении 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. 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 [8].

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

$$V_{s_{zj}} = \left(\frac{\lambda_5 \left(1 \pm \frac{\sigma_{jj}^0}{3K} \right) (1 + \omega^2 \tau_{s_5}^2)}{\bar{\rho}} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\rho_1}{\bar{\rho}} (1 - k_n) \omega^2 \tau_{s_5}^2 \right);$$

$$\alpha_{s_{zj}} = \left(\frac{\bar{\rho}}{\lambda_5 \left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{3K} \right) (1 + \omega^2 \tau_{s_5}^2)} \right)^{1/2} \frac{\omega^2 \tau_{s_5}}{2} \left(\frac{\rho_1}{\bar{\rho}} (1 - k_n) - 1 \right), \quad (1)$$

где λ_5 – модуль упругости трансверсально-изотропной среды; $\bar{\rho}$ – средняя плотность среды; ρ_1 – плотность непористой фазы; k_n – пористость среды; τ_{s_5} – время релаксации; ω – частота упругой волны; j – направление поляризации поперечной волны.

Для контроля напряженного состояния массива предложен фазовый подход, позволяющий по акустическим параметрам среды, ее плотности и изменению фазы поперечных волн δ оценивать разность действующих в массиве компонент напряжений, а значит и определять наиболее вероятное направление высвобождения внутренней энергии.

Для волны, распространяющейся перпендикулярно слоистости, сдвиг фаз равен:

$$\delta = \frac{d\omega(\sigma_{xx}^0 - \sigma_{yy}^0)}{4\rho A^{3/2} V_S^{03} \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K}\right)^{3/2}}, \quad (2)$$

а для волны, распространяющейся параллельно слоистости, –

$$\delta = d\omega \left[\frac{1}{A^{1/2} V_{S_{yx}}^0 \left(1 \pm \frac{\sigma_{yy}^0}{3K}\right)^{1/2}} \left(1 - \frac{\sigma_{xx}^0 - \sigma_{yy}^0}{4\rho A V_{S_{yx}}^{02} \left(1 \pm \frac{\sigma_{yy}^0}{3K}\right)} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{A^{1/2} V_{S_{zx}}^0 \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K}\right)^{1/2}} \left(1 - \frac{\sigma_{xx}^0 - \sigma_{zz}^0}{4\rho A V_{S_{zx}}^{02} \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K}\right)} \right) \right], \quad (3)$$

где σ_{ii}^0 ($i = x, y, z$) – главные компоненты тензора начальных напряжений; d – толщина слоя.

Предложен коэффициент анизотропии Q горных пород с плоскопараллельной структурой, который характеризует не только анизотропию упругих свойств, но и анизотропию распределения напряжений в породном массиве

$$Q = \frac{V_{P_{11}}}{V_{P_{\perp}}} = \left(\frac{2(2\lambda_2 + \lambda_3) \left(1 \pm \frac{\sigma_{xx}^0}{3K}\right)}{\lambda_1 \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K}\right)} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Так, для горных пород со степенью слоистости $n = 0,1 \text{ мм}^{-1}$ средний коэффициент анизотропии $Q_{cp} = 1,17$, а для горных пород с $n = 0,86 \text{ мм}^{-1}$ $Q_{cp} = 1,60$. Следует отметить, что характер изменения скоростей ультразвуковых волн, распространяющихся параллельно и перпендикулярно слоистости, от напряжения различный.

Установлены зависимости для потенциала и напряженности электромагнитного поля, возникающего при воздействии упругих волн на сейсмоэлектрически активную область горного массива, от упругих, акустических и электрических свойств влагосодержащих горных пород и получена формула, позволяющая оценить величину механических напряжений в исследуемом массиве на основе применения сейсмоэлектрического метода.

Рассмотрены возможности пассивных геофизических методов для исследования напряженного состояния породного массива. На основе энергетического подхода к изучению трещинообразования в горных породах получено уравнение, связывающее величины механических напряжений в массиве с его поверхностной энергией, энергией акустических и электромагнитных волн.

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 сейсмоэлектрически 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:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}^0 &= 3K \left(\frac{b_1 V_p \rho^{1/2} \varepsilon^*}{a_1 d_1 (\varepsilon \varepsilon_0)^{1/2}} \sqrt{\frac{W_E}{W_u}} \mp 1 \right) \exp \left(- \left(\alpha r + \frac{t}{\tau} \right) \right) \cos \frac{\pi}{2R_0} r = \\ &= 3K \left(\frac{W_E (\lambda_1 b_1 - d_1^2)^2 \varepsilon^{*2}}{W_u a_1^2 d_1^2 \lambda_1 \varepsilon \varepsilon_0} \mp 1 \right) \exp \left(- \left(\alpha r + \frac{t}{\tau} \right) \right) \cos \frac{\pi}{2R_0} r, \end{aligned} \quad (5)$$

где a_1, b_1, d_1 – электрические параметры исследуемой среды; W_u, W_E – плотности энергий акустических и электромагнитных излучений; ε_0 – электрическая постоянная; ε^* – относительная деформация.

Выводы

1. Обоснованы научные принципы получения первичной информации о свойствах и состоянии массива в естественных условиях с применением аппаратурных средств, позволяющих обосновать формы проявления горного давления в подземных выработках.

2. Получены уравнения, позволяющие по акустическим параметрам среды, ее плотности и изменению фазы продольных и поперечных волн оценивать разность действующих в массиве компонент напряжений и определять наиболее вероятное направление высвобождения внутренней энергии. 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 рас-

пространении в пористой (трещиноватой) среде проявляется в нелинейной зависимости коэффициентов затухания от частоты, что в совокупности составило базу для количественной оценки напряжений и структурных неоднородностей в углепородном массиве.

3. Разработаны теоретические основы диагностики свойств и напряженно-деформированного состояния слоистых горных пород по динамическим и кинематическим параметрам акустических и электромагнитных полей. Получены уравнения, позволяющие оценивать напряженное состояние твердого тела по его упругим, электрическим постоянным и соотношению электромагнитной и акустической энергий, излучаемых материалом в процессе его деформирования или других внешних воздействий. На основе энергетического подхода к рассмотрению трещинообразования в горных породах доказана перспективность применения пассивных геофизических методов и спектрального анализа геофизической информации для контроля напряженно-деформированного состояния породного массива и прогноза его изменения во времени и пространстве. Эти результаты положены в основу разработки методов натуральных исследований, отличающихся учетом синергетических явлений и их развития в пространственно-временном континууме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкин Е.М. Синергетика геосистем: новый подход в инженерной геологии // Инженерная геология. – 1992. – № 6. – С. 11-13.
2. Яланский А.А., Паламарчук Т.А. Оценка тектонического состояния шахт Донбасса по результатам натуральных исследований // Измерение напряженно-деформированного состояния и свойств пород в массиве при отработке месторождений полезных ископаемых. – Апатиты: Кольский фил. АН СССР. – 1985. – С. 32-36.
3. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1990. – 270 с.
4. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 381 с.
5. Николин Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. – М.: Мир, 1979.- 512 с.
6. Усаченко Б.М., Кириченко В.Я., Шмиголь А.В. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1992. – 168 с.
7. Макушок Е.М. Механика твердого деформируемого тела, учитывающая элементы самоорганизации деформационного процесса // Металлургия. – 1999. – № 24. – С. 103-104.
8. Паламарчук Т.А. Теоретичні основи геофізичної діагностики геомеханічного стану породного масиву з урахуванням синергетичних процесів: Автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.15.11; 05.15.09. – Днепропетровск, 2002 – 36 с.