

10. Колосов В.А. Повышение качества железорудной продукции и показателей работы шахт на основе совершенствования технологии добычи и переработки: Дис...докт. техн. наук: 05.15.02. - Кривой Рог, - 2002. - 446с.
11. Мартынов В.К., Кудрявцев М.С. К вопросу о снижении потерь на лежачем боку // Разработка рудных месторождений. – КГРИ. – М.: Недра, 1969. – С.53-57.
12. Совершенствование системы подэтажного обрушения / Сторчак С.А., Щелканов В.А., Витряк В.А., Сбитнев В.А., Хивренко В.О. // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ. – Вып. 74. – 2001. – С. 39-42.
13. Калініченко О.В. Зниження втрат і збіднення руди при відпрацюванні рудних тіл / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, С.М. Чухарев, О.В. Калініченко // Актуальные проблемы современной науки: тезисы докладов Международной научно-практической конференции (Москва-Будапешт-Вена, 27 марта 2015 г.) : тез. докл. – Москва-Будапешт-Вена, 2015. – С. 33–37.
14. Калініченко В.О. Развитие научных основ рационального использования сырьевой базы кривбасса при включении в разработку потерянных руд и магнетитовых кварцитов. Дис...докт. техн. наук: 05.15.02. - Кривой Рог, - 2008. - 332с.
15. Калініченко О. Дослідження та удосконалення процесу випуску відбитої руди в блоках с трапецієподібним днищем / М. Ступнік, О. Калініченко // Школа підземної розробки: тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції/редкол.: В.І.Бондаренко та ін.. – Д.:ЛізуновПрес.2018. -116с.

Рукопис подано до редакції 05.04.2018

УДК 622.817.4

А.Н. ШАШЕНКО, д-р техн. наук, проф., А.В. СКОБЕНКО, канд. техн. наук, доц.,  
В.И. КОРОЛЬ, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ПРИЗАБОЙНОЙ ОБЛАСТИ УЧАСТКА ГЕТЕРОГЕННОГО ПОРОДНОГО МАССИВА

**Цель.** Исследование процессов возникновения акустических колебаний в призабойной зоне отрабатываемого выбросоопасного пласта, как источника информации для его оперативной диагностики.

**Методы исследований.** Приведены результаты аналитических исследований процессов возникновения акустических колебаний в призабойной части участка гетерогенного породного массива. Показано, что в этой области имеет место множественное возникновение трещин-эмитентов акустических колебаний, размер которых равен  $10^{-6}$  м.

**Научная новизна.** Исследования показали, что анализ акустических колебаний, возникших при разрушении локальной области угольного пласта, возможен только в вероятностно-статистической постановке путем анализа их структуры конкретного породного массива, частоты и интенсивности воздействия на него совокупности статических и динамических нагрузок.

**Практическая значимость.** Исследования амплитудно-частотных характеристик возникающих акустических колебаний в стохастически неоднородном углепородном массиве позволят повысить надежность и достоверность прогноза возникновения газодинамических явлений, используя новые параметры и критерии.

**Результаты.** При технологическом воздействии на призабойную зону напряженно-деформированного состояния участка выработки угольного пласта таково, что в области массива, непосредственно контактирующей с работающим органом комбайна, происходит множественное возникновение трещин, распределение числа которых по размерам подчиняется одному из вероятностных законов распределения. Это позволит в последующем, опираясь на результаты настоящих исследований, разработать вероятностно-статистическую модель распространения акустического сигнала по структурно неоднородному волноводу, каким является выбросоопасный газонасыщенный угольный пласт, и на этой основе предложить дополнительные критерии возникновения газодинамических явлений.

**Ключевые слова:** амплитудно-частотные характеристики, призабойная зона, выбросоопасный угольный пласт, источник акустических колебаний, скорость распространения звука, неоднородный углепородный массив, энергетический критерий разрушения

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-8-13

**Проблема и её связь с научными и практическими заданиями.** Использование искусственных акустических колебаний в качестве источника информационного о структуре породного массива, локализации силовых неоднородностей и т.п., на сегодняшний день является наиболее перспективным методом исследований. Известно, что акустические волны, проходя через породный массив, хорошо взаимодействуют с содержащимися в нем неоднородностями, которые ответственны за качество добываемого угля, возникновение газодинамических и динамических явлений. Кроме того, процессы распространения акустических колебаний в породном

массиве хорошо коррелируют с развитием трещиноватости, сопровождающей создание подземных искусственных полостей.

**Анализ исследований и публикаций.** Применительно к отработке выбросоопасного угольного пласта исследования [1] показывают, что источником акустических колебаний в породном массиве в исследуемой области спектра является процесс разрушения горных пород работающим органом комбайна, локализуемый в призабойной зоне пласта [2] (рис. 1). Отклик, образующейся при этом трещины на силовое воздействие, должен быть резонансным. Акустические сигналы, генерируемые в массиве при технологическом воздействии на пласт, независимо от параметров воздействия при мощности пласта около 1 м имеют пик амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), равный, примерно, 600 Гц.

Исследование принимаемых акустических сигналов обычно выполняют путем их разложения в ряд Фурье. При этом подразумевают, что вмещающие породы имеют физические характеристики, существенно отличающиеся от таких же – угольного пласта, а их свойства как акустического волновода нерегулярной структуры близки к идеальным.

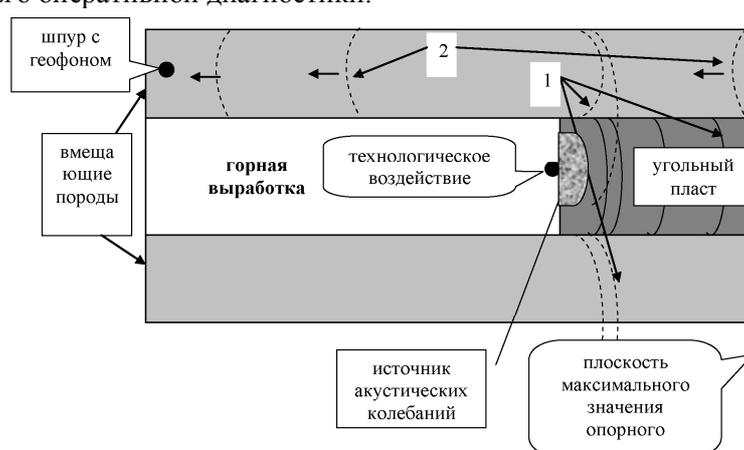
При разложении возникшего акустического импульса в ряд Фурье можно выделить один сигнал со своей частотой и фазой

$$F(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\varphi_i$  – соответственно амплитуда, круговая частота и начальная фаза  $i$ -й составляющей акустического сигнала.

Анализ уравнения (1) позволяет получить информацию об акустических процессах, идущих в исследуемой области.

**Постановка задачи.** Исследование процессов возникновения и распространения акустических колебаний в призабойной зоне обрабатываемого выбросоопасного пласта, как источника информации для его оперативной диагностики.



**Рис.** Участок в окрестности забоя лавы: 1 – акустические волны, идущие от источника колебаний; 2 – акустические волны, отраженные от плоскости максимума опорного давления

**Изложение материала и результаты.** Реальный массив представляет собой структурно неоднородную среду. По данным [3], в настоящее время выявлен широкий класс таких сред, к которым относятся и горные породы, структура которых характеризуется наличием различных включений типа зерен, пор, трещин, и т.п., определяющих их нелинейные свойства.

Каждый единичный акт возникновения трещины в твердом теле [4-6] сопровождается излучением кванта акустического излучения в окружающую среду. Энергия акустической волны, возникшей при раскрытии единичной трещины, может быть определена следующим уравнением

$$E_0 = h \cdot \nu_0, \quad (2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu_0$  – частота элементарной акустической волны, Гц.

Подставляя в (2)  $\nu_0=600$  Гц, имеем  $E_0 = h \cdot \nu_0 = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 600 = 2,16 \cdot 10^{-31}$  Дж/м<sup>3</sup>.

Частота излучения может быть определена путем измерений [4-6] и равна

$$\nu = \frac{c}{\pi \cdot a \cdot n^2}. \quad (3)$$

где  $c$  – скорость акустических волн в породном массиве, м/с;  $n$  – число возникающих трещин, шт/м<sup>3</sup>.

Скорость распространения звука в горных породах в дальнейшем для простоты принимаем  $c=2000$  м/с. Принимая, в соответствии с работой [7] структурную модель твердого тела в виде идеальной кристаллической решетки, по углам которой находятся частицы, удерживаемые силами связи, можно рассчитать величину усилия, которое потребуется, чтобы разорвать эту связь и тем самым разрушить деформируемое тело. А.А. Гриффитс [8, 9] показал, что прочность хрупких твердых тел определяется прочностью на разрыв структурных связей, существенно ослабленных за счет микродефектов. В осадочных породах, например, наличие микродефектов и трещин связано с генезисом и последующим метаморфизмом.

Для решения поставленной А.А. Гриффитс рассмотрел случай заданных нагрузок, как явно приводящий к разрушению образца при приложении некоторых критических нагрузок.

Пусть образец с сечением в единицу площади и длиной  $Y$  испытывает продольное растяжение внешней нагрузкой  $P$ , порождающей напряжения  $\sigma$ . В данном случае  $P = \sigma$ . Тогда энергия упругой деформации образца будет равна  $Y\sigma^2/2E$ . Если образец содержит трещину, которая расположена перпендикулярно к линии действия силы и имеет длину  $2a$ , то образец удлинится, что на основе решения Инглиса увеличит энергию деформации на  $\pi\sigma^2 a^2/E$ . Таким образом, полная энергия деформации станет равной

$$\frac{Y\sigma^2}{2E} + \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} = \frac{\sigma^2}{2E} (Y + 2\pi a^2). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что эффективный модуль упругости образца с трещиной равен  $2E/(Y+2\pi a^2)$ . Трещина также приносит поверхностную энергию  $Y=2a\cdot\gamma$ , где  $\gamma$  – удельная поверхностная энергия,  $\gamma = E_a r_a / 30$  [10], ( $r_a$  – радиус атома).

Работа  $w$ , совершаемая напряжением  $\sigma$  при удлинении образца, вызванном появлением трещины, равна

$$w = \sigma Y (\varepsilon_c - \varepsilon), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – относительная продольная деформация образца при отсутствии трещины, а  $\varepsilon_c$  – то же, но после появления трещины.

Следовательно

$$w = \sigma^2 Y \left( \frac{Y + 2\pi a^2}{2E} - \frac{1}{E} \right) = \frac{2\pi\sigma^2 a^2}{E}. \quad (6)$$

Используя в качестве основного энергетический критерий разрушения, разрушающее напряжение определится следующим соотношением

$$\frac{d(2\pi\sigma_p^2 a^2 E^{-1})}{da} = \frac{d(4a\gamma E^{-1} + \pi\sigma_p^2 a^2 E^{-1})}{da}, \quad (7)$$

откуда

$$\sigma_p = \left( \frac{E\gamma}{\pi a} \right)^{0,5}. \quad (8)$$

В соответствии с теорией Гриффитса [7], величина элементарной трещины, возникающей при разрушении элемента породного массива и являющейся причиной возникновения элементарной акустической волны, равна:  $a \approx 0,5 \cdot 10^{-6}$  м.

Опираясь на соотношение (3), можно примерно рассчитать число возникающих трещин при акте элементарного приращения разрушающего напряжения в элементе породного массива, в котором возникает акустическое излучение. Принимая  $\nu = 600$  Гц, и  $c = 2000$  м/с, получим:  $n \approx 3000$  шт/м<sup>3</sup>.

В соответствии с данными работы [5], удельная энергия эмиссии акустических волн может быть определена следующим выражением

$$E_a = \mathcal{E}_0 \cdot n = 2,16 \cdot 10^{-31} \cdot 3000 = 6,48 \cdot 10^{-28} \text{ Дж/м}^3. \quad (9)$$

С другой стороны, энергия акустического излучения может быть определена по амплитуде и длительности импульса для дискретного спектра [11–13]

$$E_a = \sum_{i=0}^{\infty} (A_i)^2 \tau_i = \frac{1}{2} \rho \cdot u_i^2 \omega_{ij}^2, \quad (10)$$

где  $u_i$  – смещения;  $\omega_{ij}$  – тензор вращения;  $\tau_i$  – длительность импульса,  $\rho$  – плотность горной породы.

Соответственно, для непрерывного спектра последнее выражение приобретает вид

$$E_a = \int_0^{\infty} A(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} u_0 du \int_0^{\infty} \omega d\omega. \quad (11)$$

где  $u_0$  – величина начальных смещений,  $A$  – амплитуда единичного импульса.

Энергия импульса, согласно теореме Парсеваля, выражается следующим образом [6]

$$\int_0^{\tau} \sigma^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F^2(\omega) d\omega, \quad (12)$$

где  $F(\omega)$  – члены ряда Фурье (см. выражение (10)) для импульса  $\sigma$ ;  $\omega$  – частота спектральных членов.

В предположении, что импульсы имеют форму затухающей синусоиды [14], спектр одиночного импульса можно найти с использованием преобразования Фурье в виде

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (13)$$

где  $f(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t$ .

Тогда ([14])

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(\alpha+i\omega)t} \sin \omega_0 t dt = A \omega_0 / (\alpha^2 - \omega^2 + 2i\alpha\omega). \quad (14)$$

где  $\omega_0$  – собственная частота импульса,

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{\tau}, \quad (15)$$

где  $\tau$  – длительность импульса.

Таким образом, получен сплошной спектр, начинающийся от 0 и имеющий максимум при частоте  $\omega = \omega_0$  (при  $\alpha = 0$  максимум расположен точно на частоте  $\omega_0$ ).

При частотах  $\omega \ll \omega_0$  спектральная плотность определяется выражением

$$\psi \approx A \cdot \omega_0 / (\omega_0^2 + \alpha^2), \quad (16)$$

откуда следует, что спектральная плотность  $\psi$  в области низких частот пропорциональна амплитуде  $A$  импульса [14–16]. Выделившаяся при этом удельная энергия трещинообразования  $E_{mp}$  пропорциональна объему очага, то есть  $E_{mp} \sim a^3$ . Это значит, что при реализации элементарного приращения разрушающего напряжения в элементе породного массива выделяется энергия порядка  $E_{mp} \sim (2 \cdot 10^{-6})^3 \cdot n \approx 8 \cdot 10^{-18} \cdot 3000 \approx 2,4 \cdot 10^{-16}$  Дж/м<sup>3</sup>.

Сравнивая полученные значения выделившейся энергии  $E_{mp} \approx 2,4 \cdot 10^{-16}$  Дж/м<sup>3</sup> и удельной энергии акустического излучения  $E_a = 6,48 \cdot 10^{-28}$  Дж/м<sup>3</sup> при этом процессе, можно сделать вывод о том, что их значения различаются почти на 12 порядков. Этот результат показывает, какая доля энергии при возникновении трещин в породном массиве расходуется непосредственно на акустическую эмиссию (АЭ), а какая идет на разрыв структурных связей.

Исследования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) акустических колебаний, возникших в стохастически неоднородном породном массиве, приведенные выше являются осно-

вой для дальнейшего совершенствования прогноза газодинамических явлений на основе вероятностных критериев и параметров.

#### **Выводы и направления дальнейших исследований.**

1. При технологическом воздействии на призабойную зону напряжённо-деформированного состояния участка выработки угольного пласта таково, что в области массива, непосредственно контактирующей с работающим органом комбайна происходит множественное возникновение трещин, распределение числа которых по размерам подчиняется закону Вейбулла, или ему подобному, например равномерному, распределению Раммлера или Шумана.

2. Возникающие трещины служат генераторами акустических колебаний. При этом средний размер возникающих трещин находится в диапазоне порядка  $10^{-6}$  м.

3. Определено число возникающих трещин-эмитентов при реализации элементарного прращения разрушающего напряжения в единице объема.

4. Энергия, затрачиваемая на АЭ при возникновении трещин в породном массиве примерно на 12 порядков меньше общей величины энергии, выделяющейся при разрушении элемента породного массива.

5. Исследования амплитудно-частотных характеристик возникающих акустических колебаний в стохастически неоднородном углепородном массиве могут позволить осуществить прогноз вероятности возникновения газодинамических явлений, используя новые параметры и критерии.

6. Более детальный анализ акустических колебаний, возникших при разрушении локальной области угольного пласта возможен только в вероятностно-статистической постановке путем анализа их структуры конкретного породного массива, частоты и интенсивности воздействия на него совокупности статических и динамических нагрузок.

#### *Список литературы*

1. Обоснование параметров метода прогноза внезапных выбросов угля и газа на шахтах Донбасса // Отчет по теме ОБ-34 (заключительный). – Днепропетровск: НГУ, 2007. – 126 с.
2. **Крылов В.В., Ланда П.С., Робман В.А.** Модель развития акустической эмиссии как хаотизация переходных процессов в связанных нелинейных осцилляторах // Акустический журнал. – 1993. – Т. 39, №1. – С. 108-122.
3. **Беляева И.Ю., Зайцев В.Ю.** О предельном значении параметра упругой нелинейности структурно неоднородных сред // Акустический журнал. – 1998. – Т. 44. – №6. – С. 731-737.
4. **Колесников В.Г.** Управление разрушением напряженных пород с позиций динамической микромеханики // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 1997. – №3. – С. 92 – 95.
5. **Колесников В.Г., Гроссу А.И.** Физические аспекты контроля деформирования и разрушения напряженных горных пород // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 1997. – №3. – С. 97-100.
6. **Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г.** Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2001. – 413 с.
7. **Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н.** Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография. – Днепропетровск.: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
8. **Griffith A.A.** The theory of rupture. – Proc. Int. Congr. Appl. Mech. – Delft. – 1924. – P. 55-63.
9. **Тимошенко С.П., Гудьер Дж.** Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
10. **Петч И.** Металлографические аспекты разрушения // Разрушение, Т.1. – М.: Мир, 1973. – С. 376 – 420.
11. **Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А.** Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
12. **Паламарчук Т.А.** Теоретические предпосылки использования динамических характеристик акустических и электромагнитных полей для диагностики напряженного состояния массива горных пород // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 1997. – №3. – С. 53-56.
13. **Паламарчук Т.А., Хохолев В.К., Приходченко В.Л.** Теоретические обоснования исследования процесса деформирования твердого тела методами АЭ и ЭМИ / Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. Рук. Деп. в ВИНТИ 1989. – №3415. – В89.
14. **Виноградов С.Д.** Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М.: Наука, 1964. – 84 с.
15. **Кузнецов В.М., Лившиц Л.Д.** О распределении по размерам фрагментов, образующихся при разрушении твердого тела // Изв. АН СССР Физика Земли. – 1984. – №2. – С. 16-26.
16. **Rosin P., Rammler E.** Die Kornzusammensetzung des Malgutes im Lichte der Warscheinlichkeitslehre // Kolloid. Zeitschrift. – 1934. – Н. 1. – В. 67. – P. 16-26.

Рукопись поступила в редакцию 08.04.2018