

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ РАССЛОЕНИЯ
ПОТОЛОЧИН БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Розглянуто процес вільних коливань в тонкій плиті при її демпфіруванні. Обґрунтовано параметри та критерії віброакустичної діагностики стелин гірничих виробок великого прольоту.

**THEORETICAL AND APPLICATION ASPECTS OF A
VIBRATING-ACOUSTIC DIAGNOSIS OF A DISINTEGRATION
WIDE-SPAN ROOFS OF A EXCAVATIONS**

The process of free oscillations in a thin plate at a decrement is considered. The parameters and criterion of a vibrating-acoustic diagnosis of disintegration wide-span roofs of excavations are proved.

Одним из главных источников опасности при длительной эксплуатации выработок большого пролета является обрушение кровли. Длительные наблюдения за поведением кровли в отработанных камерах гипсовых шахт, показали, что этот процесс при отсутствии геологических нарушений в потолочине не происходит мгновенно. Его развитие подчиняется определенным закономерностям.

Начало деформационных процессов в потолочине выработки связано с ее расслаиванием по слабым пропласткам на отдельные породные пачки. Их мощность колеблется от десятков сантиметров до 2 метров. Величина воздушного зазора между слоями в кровле может составлять от единиц до десятков миллиметров. Процесс формирования зазора продолжается обычно несколько лет. Возможны несколько вариантов его дальнейшего развития. По первому, маловероятному варианту, процесс прогиба слоев затухает. По второму варианту, который чаще всего имеет место на практике, скорость опускания нижнего слоя кровли по отношению к глубинным слоям массива стабилизируется на уровне десятых долей миллиметра в год. Площадь зоны отслоения также постепенно увеличивается. Вследствие возникших напряжений в кровле возникает система трещин. Такая структура кровли является потенциально опасной по фактору обрушения и требует наблюдения и принятия инженерных мероприятий по креплению. Третий вариант – это развитие аварийной ситуации, когда скорость опускания кровли быстро нарастает, что в конечном итоге приводит к ее обрушению.

Вышесказанное свидетельствует о важности задачи регулярного и эффективного контроля за состоянием потолочины. Одним из наиболее оперативных методов контроля является виброакустический.

Суть метода заключается в возбуждении собственных колебаний участка потолочины и регистрации их параметров: начальной или усредненной за определенный период времени амплитуды колебаний, продолжительности пакета колебаний, спектрального состава либо других характеристик [1, 2].

Для обоснования критериев состояния потолочины по параметрам ее свободных колебаний рассмотрим ее математическую модель.

В условиях камерно-столбовой системы с длинными прямоугольными целиками наиболее часто встречается случай, когда отслоившаяся породная пачка в плане закреплена по границе с целиками, а по коротким - разделена трещиной с более удаленными участками потолочины (рис. 1).

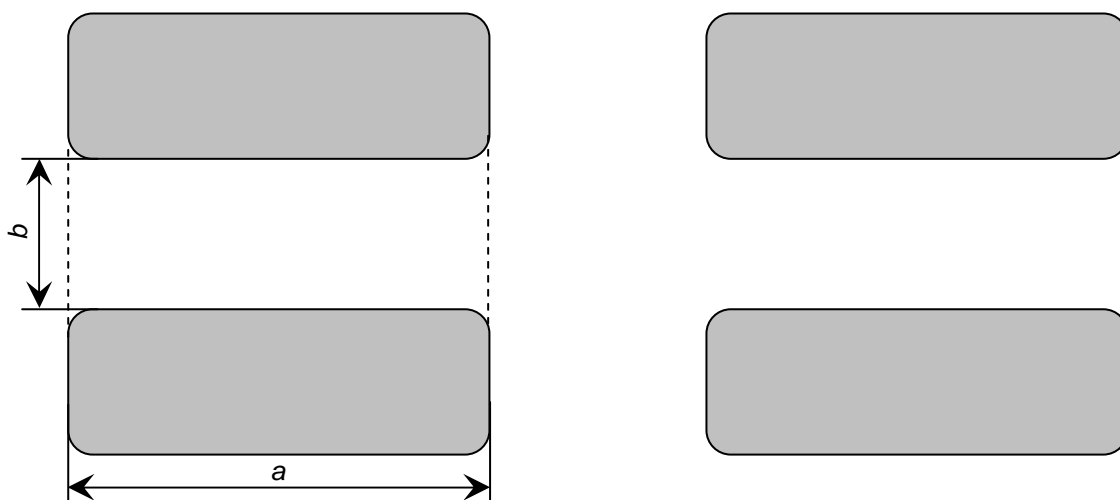


Рис. 1 – Границы отслоившейся породной пачки в плане.

Толщина отслоившегося слоя составляет в основном десятки сантиметров. Чаще всего на его верхней границе воздушный промежуток. Однако, в ряде случаев, нижний слой контактирует с другой средой, неспособной препятствовать воздействию растягивающих напряжений, но способствующей демпфированию свободных колебаний. Такой средой являются преимущественно влажные глинистые породы. Поэтому для постановки задачи принимается общий случай наличия над нижним слоем потолочины менее жесткой среды, обладающей упругими и вязкими свойствами (рис. 2).

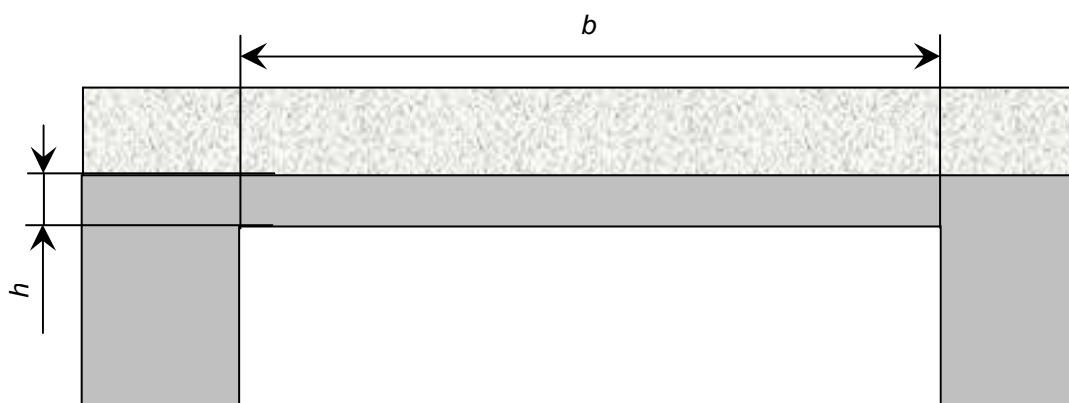


Рис. 2 – Разрез потолочины в поперечном сечении выработки

Параметры, характеризующие материал плиты, обозначаются с нижним индексом «1», а параметры, относящиеся к покрывающему слою, обозначаются, соответственно, с нижним индексом «2».

Мощность h отслоения значительно меньше его размеров в плане. Исходя из этого, для изучения характера колебательных процессов слой может моделироваться тонкой плитой. Выбор системы координат для модели иллюстрируется рис. 3.

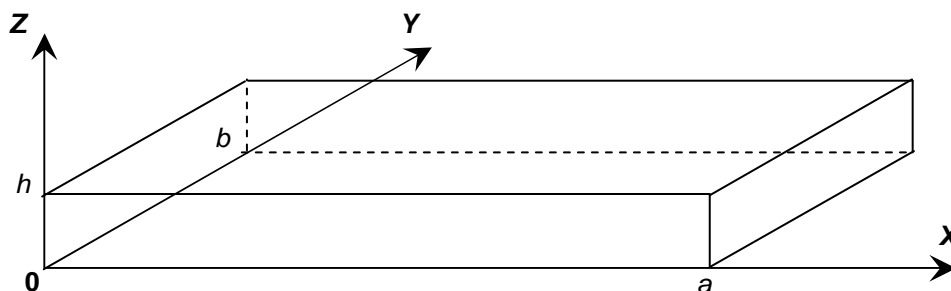


Рис. 3 – Выбор системы координат для модели

Предполагается, что материал плиты является однородным и изотропным. Особенность данной модели определяют граничные условия, которые заключаются в следующем:

защемление по коротким сторонам плиты отсутствует и вдоль этих границ, изгибающий момент $M = 0$, и перерезающая сила $Q = 0$;

защемление по длинным сторонам является упругим и вдоль указанных границ выполняются соотношения

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

где u – вибрсмещение,

α и β – параметры упругого защемления;

со стороны слоя, контактирующего с верхней гранью плиты, действует упругое сопротивление

$$p_2 = k_2 \rho_2 c_2 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

где ρ_2 - плотность покрывающей среды;

c_2 – скорость звука в покрывающей среде;

k_2 - коэффициент пропорциональности;

со стороны покрывающего слоя, кроме упругого, действует также вязкое сопротивление, определяемое коэффициентом вязкости η

$$p_2^* = k_2^* \eta_2 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (3)$$

Внутреннее трение в самом материале плиты учитывается выражением

$$p_1 = k_1 \eta_1 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (4)$$

Без учета тепловых потерь классическое уравнение колебаний тонкой плиты согласно [3] имеет вид

$$D \nabla^2 \nabla^2 u + \rho_1 h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = p, \quad (5)$$

где p – сумма внешних сил, приложенная к единичной площади поверхности плиты;

D – цилиндрическая жесткость, определяемая из выражения

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (6)$$

С учетом выражений (2) – (4) и (6) уравнение (5) приобретет вид

$$\frac{\partial^4 (u + k_1 \eta_1 \frac{\partial u}{\partial t})}{\partial y^4} + \frac{\partial^4 (u + k_1 \eta_1 \frac{\partial u}{\partial t})}{\partial x^4} + (k_2 \rho_2 c_2 + k_2^* \eta_2) \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_1 h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

Наиболее простым случаем является ударное возбуждение плиты в ее центре. В этом случае решение уравнения (7) должно быть симметричным относительно сторон плиты. На контуре плиты оно должно удовлетворять граничным условиям (1). Перечисленным выше требованиям удовлетворяет общее решение вида

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_{1mn} \operatorname{ch} i(y - 0,5b) + A_{2mn} \sin jy) \sin qx, \quad (8)$$

где A_{1mn} и A_{2mn} – функции времени;
 i, j, q – коэффициенты пропорциональности.

Подстановка (8) в (7) приводит к системе уравнений, решение которых позволяет в явном виде определить вид функций A_{1mn} и A_{2mn} :

$$A_{1mn} = A_{1mn}^0 e^{-\delta_{1mn}} \sin(\omega_{1mn} t + \theta_{1mn}) \quad (9)$$

$$A_{2mn} = A_{2mn}^0 e^{-\delta_{2mn}} \sin(\omega_{2mn} t + \theta_{2mn})$$

Параметрические функции A_{1mn} и A_{2mn} определяют две независимые совокупности колебаний: вдоль и поперек оси выработки. Для первой совокупности (вдоль выработки) значение основной частоты f_1 не зависит от ширины выработки, но зависит от параметров α и β упругого защемления и находится в пределах

$$\frac{\pi h}{4a^2} \sqrt{\frac{E_1}{3(1-\nu_1^2)\rho_1}} < f_1 < \frac{\pi h}{4a^2} \sqrt{\frac{E_1(5-4\nu_1+\nu_1^2)}{3(1-\nu_1^2)\rho_1}} \quad (10)$$

Для второй совокупности колебаний (поперек выработки) основная частота f_2 определяется выражением

$$f_2 = \frac{\pi h}{4} \sqrt{\frac{(\frac{1}{r^4 b^4} + \frac{1}{a^4})E_1}{3(1-\nu_1^2)\rho_1} \left(1 - \frac{\pi^4 k_1 \eta_1}{4\rho_1} \left(\frac{1}{r^4 b^4} + \frac{1}{a^4}\right) E_1 h^2 - \frac{1}{4\rho_1 h} (k_2 \rho_2 c_2 + k_2^* \eta_2)\right)}. \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) свидетельствуют о том, что для обеих совокупностей изгибных колебаний при фиксированных размерах плиты в плане основная частота снижается с уменьшением толщины отлаивающейся породной пачки. Указанная особенность определяет возможность использования спектрального анализа пакета колебаний для первичного поиска зон расслоения потолочины, а также для наблюдений за динамикой увеличения размеров указанных зон. В принципе спектр частот, определяемый выражениями (10) и (11) является дискретным, однако выделить отдельные близко расположенные резонансные частоты при шахтных измерениях практически нереально. Поэтому в качестве критериального параметра для регистрации зоны расслоения потолочины может быть принята наблюдаемая частота максимума спектральной плотности сигнала.

Величина показателя затухания δ для спектральных составляющих определяется выражением

$$\delta = \frac{1}{2\rho_1} (Eh^2 F(a, b, m, n) + \frac{1}{h} (k_2 \rho_2 c_2 + k_2^* \eta_2)). \quad (12)$$

Формула (12) свидетельствует о том, что величина затухания определяется двумя слагаемыми. Первое слагаемое в скобках определяет потери, связанные с внутренним трением в материале самой плиты. Второе слагаемое связано исключительно с демпфированием колебаний покрывающей вязко-упругой средой. При воздушном промежутке между породными слоями второе слагаемое отсутствует.

Функция $F(a,b,m,n)$ достаточно сложным образом зависит от величины входящих в нее параметров. Общей закономерностью является очень быстрое увеличение показателя затухания с ростом номера гармоники. Поэтому положение максимума спектральной плотности колебательного процесса будет определяться преимущественно основными частотами в соответствии с (10) и (11).

Выражение (12) свидетельствует также о быстром возрастании затухания по мере увеличения толщины плиты. Указанная зависимость является обоснованием амплитудного критерия при вибродиагностике потолочины. Зоны расслоения потолочины характеризуются значительным возрастанием усредненной амплитуды сигнала в течение некоторого интервала времени, прошедшего после ударного возбуждения кровли.

Еще одной характеристикой колебательного процесса является его продолжительность. В общем случае время t , в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в n раз, определяется следующим образом:

$$t = \frac{\ln n}{\mu_1 h^2 + \frac{\mu_2}{h}}, \quad (13)$$

где μ_1 и μ_2 – параметры, комплексно учитывающие физико-механические свойства потолочины и покрывающего породного слоя соответственно.

Исходя из выражения (13), продолжительность колебательного процесса на участках расслоения резко увеличивается.

Таким образом, первичное выделение зоны расслоения потолочины может осуществляться по следующей схеме. Путем контрольного бурения выделяют участок с заведомо цельной потолочиной. Толщина ненарушенного слоя должна составлять не менее 3 м. При таких значениях реакция на удар будет уже преимущественно определяться свойствами среды, а не параметрами конструкции. Устанавливают приемник вибрации на базе 2-3 м от точки удара и после возбуждения кровли регистрируют основные характеристики колебательного процесса. Указанные характеристики принимают в качестве эталонных. В процессе диагностики состояния потолочины определяют действительные значения параметров ее свободных колебаний и сравнивают с эталонными. Заведомо дефектные участки отличаются по значению информативного параметра в два и более раза сравнению с ненарушенным.

Запись сигналов вибрации потолочины на аналоговый носитель и их исследование в лабораторных условиях показали, что информативная область спек-

тра сигнала находится в пределах 100 - 1500 Гц. Выбор технических средств начинают с подбора первичного преобразователя вибрации, который имеет приемлемую частотную характеристику в указанном диапазоне. Основные типы используемых первичных преобразователей – сейсмоприемники и пьезоприемники. Авторы являются последовательными сторонниками использования активных приемников вибрации на базе пьезокерамических элементов. Встроенный в корпусе датчика предварительный малошумящий усилитель и фильтр позволяет обеспечить высокую чувствительность приемника, скорректировать амплитудно-частотную характеристику в полосе пропускания аналоговой части регистратора, эффективно подавить наводку от силовых сетей промышленной частоты, а также оптимальным образом согласовать высокое выходное сопротивление пьезоэлемента с входным сопротивлением регистрирующего устройства.

Реальная чувствительность датчика ограничивается уровнем акустических и электрических помех. Исследования показали, что для шахтных условий целесообразно ограничиться выходным уровнем сигнала с первичного преобразователя на уровне 10 мкВ. Максимальный уровень сигнала составляет порядка 0,1 В. Указанные значения определяют динамический диапазон работы аналоговых цепей устройства независимо от конечного регистрируемого параметра.

Воспроизведение сигнала от первичного преобразователя в лабораторных условиях на экране запоминающего осциллографа показало, что в преобладающем большинстве случаев уменьшение начальной амплитуды свободных колебаний на порядок происходит в течение интервала времени, не превышающего 0,3 с. Это значение можно считать ориентиром для средств контроля за состоянием потолочины, где в качестве информативного параметра выступает длительность колебательного процесса [4].

Таким образом, на базе теоретического анализа процесса свободных колебаний возбужденной ударом потолочины и экспериментальных данных определены критерии для выявления зон расслоений. Указаны основные требования к выбору диапазона измерения техническими средствами диагностики состояния потолочины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яланский А.А. и др. Теоретические и аппаратные разработки виброволнового контроля строительных конструкций и материалов. /Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Сергиенко В.Н., Усаченко В.Б. // Тезисы докладов IV-ой международной научной конференции «Материалы для строительных конструкций». – Днепропетровск, 1996. – С. 73.
2. Ямщиков В.С., Сидоров Е.Е., Бауков Ю.Н. Физические основы акустического метода определения дефектов связи упругих слоев с основанием // Физ. Техн. Пробл. Разраб. Полезн. Ископаемых.. – 1979. – № 3. – С. 110 – 118.
3. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. Справочник. – К.: Наукова думка, 1964. – 287 с.
4. Сергиенко В.Н., Земба В.А., Крученюк В.Д. Индикатор «ДВШ-2К» для оперативной диагностики состояния подземных и наземных сооружений // Материалы конф. «Проблемы гидромеханики в горном деле и строительстве» – К.: Изд-во КПИ, 1996. – Ч. 1. – С. 93.