

$$\int dt = \int \frac{dr_n}{\sqrt{\frac{P_n}{\rho_0} \left(\alpha + \frac{2(1-\alpha)}{k} - \frac{2}{k} \left(1 - \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^{2k} \right) \right)}}. \quad (31)$$

Этот интеграл довольно просто можно решить численными методами.

Таким образом, полученные соотношения позволяют в первом приближении оценить практически все величины, характеризующие процесс распространения цилиндрической ударной волны в грунте.

УДК 550.3:622.831:622.3.016

А.А. Яланский, Алекс.А. Яланский, В.В. Арестов

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ АКУСТИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Розглянуто особливості методики віброакустичного зондування глибинної побудови масиву гірських порід, зокрема контролю заколів, відшарувань, тріщинуватості, плоскопаралельних структур, а також кріплення гірничих виробок, тунельного оздоблення та ін.

FEATURES OF A TECHNIQUE OF SOUNDING (VIBROACOUSTIC CONTROL) OF A PLUTONIC CONSTITUTION OF A ROCK MASS

The features of a technique of sounding (vibroacoustic control) of a plutonic constitution of a rock mass are reviewed. The attention is given to the control of block and flat-parallel structures of rock mass, mine working support, tunnels lining, etc.

Горная порода – неоднородная по структуре, текстуре и свойствам среда. Неоднородности изменяются в широких пределах, например, раскрытия трещин – от 10^{-9} до 10^{-1} м при длине от 10^{-3} м до сотен метров, размеры включений и природных пустот в массиве – от 10^{-4} м до нескольких метров в сечении, зоны концентрации напряжений – от 10^{-3} м (вокруг скважин) до многих сотен метров (тектонические напряжения). Часто геологические процессы приводят к возникновению упорядоченной неоднородности массива: слоистости, блочности и периодичности элементов неоднородности, что обуславливает анизотропию среды. Для измерений неоднородность является относительным понятием. Когда область контроля значительно превышает размеры элементов неоднородности, то среду можно считать квазиоднородной, а неоднородности проявляют свои свойства только интегрально. Наоборот, если естественная неоднородность не укладывается в изучаемую область пространства, то она возможно и не будет обнаружена. Следовательно, неоднородности в массиве обладают масштабным эффектом. Степень неоднородности при измерениях условно разделяют на четыре группы: 1) неоднородности крупного масштаба, включающие фациальную изменчивость, тектонические разрывы, зоны выветривания и разгрузки, горно-технологические объекты; 2) неоднородности структуры и состава

ва пород в пределах отдельной пачки, слоя, включая макротрещиноватость, наличие мелких тектонических дислокаций; 3) неоднородность состава пород в пределах элементарного объема (образец), различие в химическом и минеральном составе, форме и размерах зерен, микротрещины; 4) неоднородности реальных кристаллов, дефектность кристаллической решетки, дислокации [1].

Основными информативными параметрами при сейсмической, виброакустической, сейсмоакустической, пьезоэлектрической или ультразвуковой диагностике являются: скорости упругих волн; амплитуды колебаний без определения частоты (пиковая амплитуда); доминирующая частота; максимальная амплитуда колебаний на заданной частоте; длительности колебательного процесса и процесса соударения ударника и среды; спектральный состав колебаний, реально определяемый дискретным набором амплитуд на фиксированных средних или заранее выбранных частотах. В случае параллельного измерения силы удара информативными параметрами могут быть различные соотношения амплитуд и длительностей колебательных процессов.

Волна – это распространение колебаний в пространстве, происходящее с конечной скоростью. Она является наиболее быстрым механизмом переноса энергии без переноса вещества, позволяющим осуществить в системе переход от неравновесного состояния к равновесному. Критерием перехода процесса от колебательного движения к волновому служат условия квазистационарности:

$$\begin{aligned} L < vT & - \text{колебательное движение;} \\ L > vT & - \text{волновое,} \end{aligned} \quad (1)$$

где L – характерные линейные размеры системы; v – скорость распространения возмущения; T – время его заметного изменения (время удара). Колебательный процесс происходит в системе с сосредоточенными параметрами ($L < vT$), а волновой – с распределенными [2].

На основе измерений скоростей упругих волн в породных массивах и материалах крепей, времени соударения и реальных размеров деревянных, бетонных и металлических конструкций и крепей цельный массив горных пород можно отнести к системе с распределенными параметрами, разрушенный массив и крепи – к системам с сосредоточенными параметрами.

В безграничной линейной среде продольные и поперечные волны распространяются независимо друг от друга. Если модуль сдвига $G = 0$, то среда ведет себя как жидкость или газ, при этом поперечные волны в ней не распространяются. При наличии границы продольные и поперечные волны становятся связанными уже в линейном приближении, так, при падении из твердого тела на его границу волны одного типа происходит трансформация части ее энергии в волну другого типа. Кроме того, возникает комбинация плоских неоднородных волн (продольных и сдвиговых), бегущих вдоль границы – волн Релея. Показатели затухания таких волн частотно-зависимы; толщина приповерхностного слоя, в котором сосредоточена энергия, тем меньше, чем короче длина волны. При проведении горных выработок буровзрывным способом приконтурный

массив выработок насыщен неглубокими трещинами, поэтому высокочастотные составляющие поверхностных волн быстро затухают. Для реальных твердых тел величина скорости волн Релея близка к скорости сдвиговых волн ($0,87v_s < v_r < 0,96v_s$) [2].

Коэффициент отражения V представляет собой отношение амплитуды отраженной от границы волны к амплитуде падающей волны; коэффициент преломления (прохождения) W – отношение амплитуды преломленной волны к амплитуде падающей. Процесс отражения–преломления на каждой границе слоя может повторяться, поэтому необходимо учитывать большое число преломленных и отраженных волн. Если отношение толщины слоя h к длине волны, распространяющейся внутри его, меньше двух ($h/\lambda < 2$), то слой считается тонким, в другом случае – толстым. Наиболее важной особенностью слоистых сред является сложность волновой картины, поскольку на каждой границе между соседними слоями образуются четыре новые волны – две отраженные (продольная и поперечная) и две преломленные, каждая из которых, попадая на другую границу, станет причиной аналогичного процесса [3]. Даже в случае образования внутри слоя обменных волн количество отдельных волн в волновом пакете будет конечной величиной, так как в последующих отражениях и преломлениях амплитуда их значительно уменьшается даже без учета затухания в слоях. Если скорости волн в слоях различны, то возникает целая система неоднородных волн.

Передний фронт акустического сигнала всегда распространяется со скоростью продольных волн в массиве, то есть с максимальной скоростью. Диспергирующие свойства горных пород в зависимости от длины волны объясняются слоистостью и трещиноватостью среды, кристаллическим строением и температурным движением частиц, изменчивостью физических свойств и вещественного состава, наличием включений и пустот, структурных блоков и плоскопараллельных структур. Это значит, что в спектральном разложении сигнала конечной длительности всегда присутствуют сколь угодно высокие частоты, для которых $v_{gp} \approx v_{\phi} \approx v_p$, где v_{gp} и v_{ϕ} – групповая и фазовая скорости. Однако доля энергии этих частот в спектре квазимонохроматического сигнала относительно мала. Поэтому передняя часть сигнала, так называемый первый предвестник, имеет малую амплитуду и высокую частоту. Скорость, с которой прибывает основная часть установившегося сигнала, всегда меньше v_p . Учитывая его энергетическую значимость, в последние годы резко увеличился объем работ на преломленных и отраженных поперечных волнах [4].

Акустическое поле однородной нормальной волны в слое имеет вид

$$u_n = A_n \exp \left\{ i\omega \left[t - \frac{x}{v} \left(1 - \left(\frac{n\lambda}{2a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \sin \left(\frac{\pi n}{a} y \right), \quad (2)$$

где u - смещение, функция координат и времени; A - амплитуда, в общем виде комплексная величина; ω - циклическая частота; t - время; x, y - координаты; v - скорость упругих волн, n - номер моды, λ - длина волны, a - ширина волновода [2].

Семейство уравнений, отличающихся номером n , описывает возмущения, не изменяющие своего вида при распространении в слое, что выполняется при условии

$$\lambda < \lambda_{кр} = 2a/n, \quad (3)$$

где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны для моды с номером n , ей соответствует критическая частота $f_{кр} = \frac{vn}{2a}$. На длинах волн $\lambda < 2a$ или частотах $f > v/2a$ в слое можно возбудить любую из мод. Наибольшей длиной волны обладает мода с $n = 1$. Когда $\sin \theta = 1$, а $\theta = \pi/2$, слой превращается в резонатор, и между стенками образуется стоячая волна, амплитуда которой постоянная вдоль слоя. Выполнены расчеты графиков зависимости критической частоты первой моды от скорости продольной волны и толщины слоя в диапазонах изменения аргументов, характерных для диагностируемых объектов тоннелей, шахт и подземных сооружений, которые приведены на рис. 1. Если не выполняется условие (3), то (2) примет вид

$$u_n = A_n \exp \left\{ -\frac{\omega}{v} x \left[\left(\frac{n\lambda}{2a} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \exp(i\omega t) \sin \left(\frac{\pi n}{a} y \right), \quad (4)$$

т.е. с увеличением расстояния x вдоль оси слоя волна будет экспоненциально затухать [2].

В этой связи можно сделать важное заключение для методики контроля плоскопараллельных структур при одностороннем доступе к массиву, а именно, при увеличении расстояния от источника возбуждения массива, в конечном счете, будут фиксироваться только стоячие волны, резонаторами для которых является обнаженная поверхность выработки и поверхности изменения литологии пород или отслоений. Таким образом, в приповерхностном слое образуются классические акустические волноводы – участки среды, ограниченные в одном или двух направлениях пустотами, трещинами или другими средами, в результате чего устраняется или уменьшается расхождение волн в стороны, поэтому распространение их вдоль слоев происходит с меньшим ослаблением, чем в неограниченной однородной или неоднородной среде. Единственный вид волны, распространяющийся в таких акустических волноводах без изменения своей

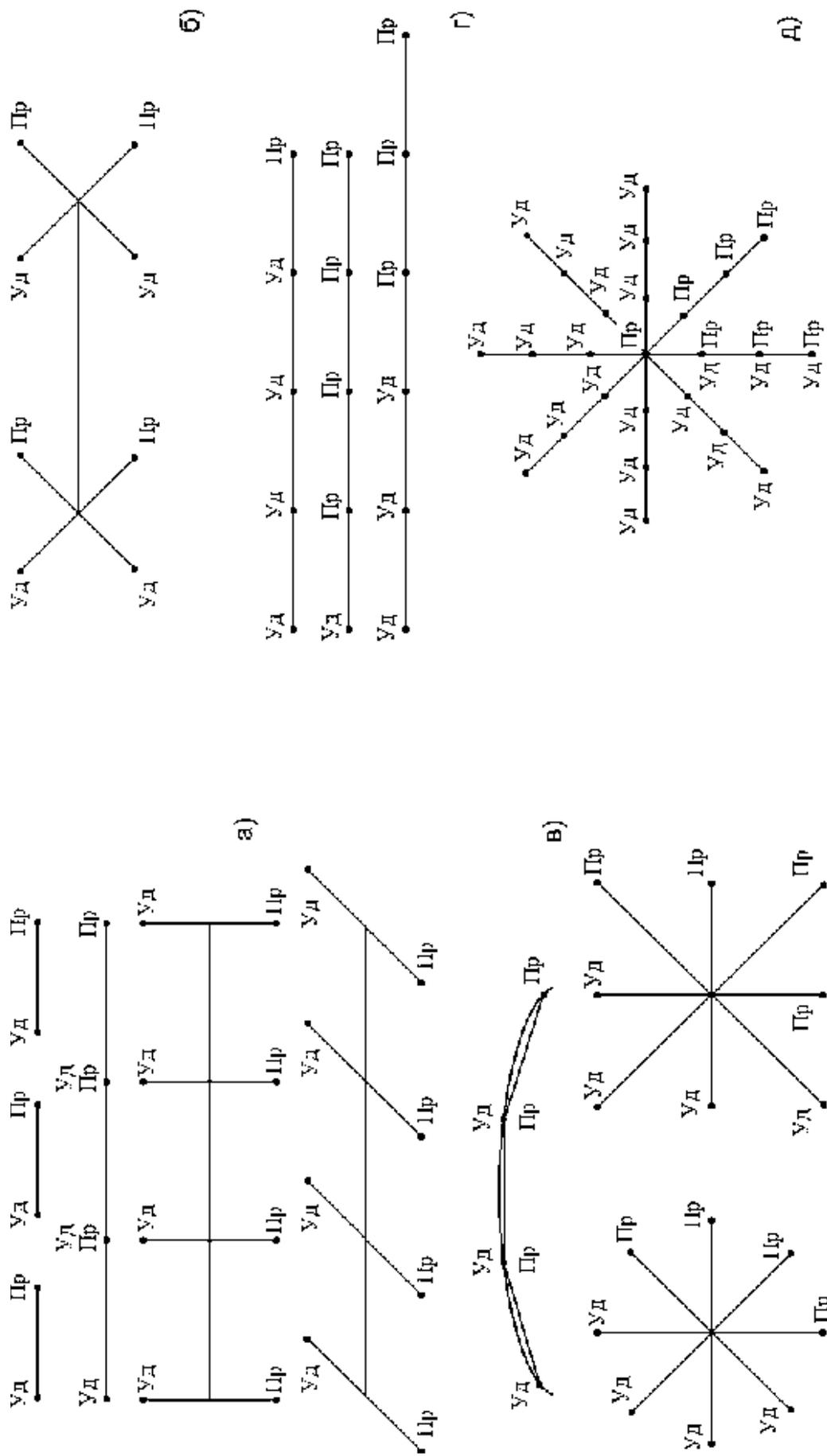


Рис. 1 – Схемы виброакустического контроля устойчивости подземных выработок и конструкций (Уд – точка приложения удара при простукивании, Пр – точка съема сигнала приемником): векторное (а), квадратное (б) и круговое (в) профилирование; линейное (г) и круговое (д) зондирование

структуры, - нормальные волны (моды). Гармоническая бегущая волна (2) – однородная нормальная волна, экспоненциально затухающая (4) – неоднородная нормальная волна. Закрывание трещин, отслоений в массиве или между крепью и массивом под воздействием нагрузки однозначно переводит однородную нормальную волну в неоднородную, экспоненциально затухающую.

Длина волны, фазовая и групповая скорости в акустическом волноводе определяются фазовым членом в решении (2) и соответственно равны [2]:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}}; \quad v_{\phi} = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}} > v;$$

$$v_{gp} = v \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}} < v. \quad (5)$$

Акустические параметры горных пород зависят от физико-механических свойств, слагающих минералов, пористости, а также структуры, состояния, температуры и других внутренних и внешних факторов. Коэффициент затухания увеличивается с ростом частоты из-за рассеивания на кристаллах, однако четкой функциональной зависимости не установлено. В основном зависимость линейная, для гранитов в интервале частот 10-1000 КГц - квадратичная. В осадочных породах коэффициент затухания равен 1,3-2 м⁻¹ для поперечных волн, он в 1,1-2 раза больше коэффициента затухания продольных волн, но у высокопластичных влажных глин и водонасыщенных песков это различие может достигать 5 и более раз, поскольку в жидкости сдвиговые волны не распространяются. Затухание упругих волн ограничивает базу контроля, однако способствует выделению в акустическом сигнале в совокупности различных типов волн только тех из них, которые резонируют с блоковыми и плоскопараллельными структурами массива или крепи. В акустическом волноводе можно возбудить

множество резонирующих мод, с длинами волн $\lambda = \lambda_{кр} = \frac{vn}{2a}$, отличающихся

номером n . С увеличением n амплитуда моды, как правило, уменьшается, поэтому существенное влияние на волновую картину в слое оказывают в основном первая и вторая моды. Это подтверждается и экспериментальными данными. В случае сопоставимости амплитуд первой и второй моды нормальных поперечных волн возможна ошибочная интерпретация анализа спектрограмм акустических импульсов, так как по спектрограмме невозможно определить, каким модам соответствуют пики спектральной плотности. Для исключения неоднозначности следует учитывать, что: а) для того, чтобы плоскопараллельный слой пород выступал как акустический волновод, база прозвучивания должна быть не меньше толщины слоя; б) с увеличением базы прозвучивания отношения

амплитуд высших мод к амплитуде первой моды уменьшаются; в) с понижением верхней границы частотного диапазона измерения расширяется диапазон возможных баз прозвучивания, в пределах которого регистрируется только первая мода нормальных резонансных колебаний, а его границы смещаются в сторону увеличения абсолютного значения. Например, при прозвучивании бетонных конструкций с применением пропускающего фильтра низких частот с частотой среза 4 кГц первая мода нормальных резонансных колебаний регистрируется для плит толщиной не менее 0,5 м, вторая мода – для плит толщиной не менее 1 м (рис. 2, а, цифрами обозначены номера мод). Таким образом, пик спектральной плотности нормальных волн на частоте до 4 кГц при базе прозвучивания до 1 м однозначно соответствует первой моде.

В тонкостенных металлических конструкциях, в длинных стержнях или пластинах (арочные крепи, тьюбинги, затяжки и т.д.) под воздействием удара возникают деформации изгиба, а, следовательно, изгибные колебания и волны. Длина изгибной волны всегда много больше толщины стержня или пластинки. При распространении изгибных волн каждый элемент стержня или плоскости пластинки смещается перпендикулярно оси стержня или плоскости пластинки. Фазовые скорости изгибных волн много меньше фазовых скоростей продольных волн, фазовая скорость монохроматической изгибной волны пропорциональна квадратному корню ее частоты, а, следовательно, обратно пропорциональна толщине изгибающегося слоя. По частоте изгибные колебания попадают в низкочастотную область.

По взаимному расположению излучателя и приемника акустических колебаний схемы глубинного контроля аналогично электрометрии [1] подразделяются на: векторные, квадрупольные, кругового профилирования, линейного и кругового зондирования, смешанные или их частные случаи и модификации, рис. 1.

По аналогии с методами электрометрического контроля предложены и апробированы следующие методы виброакустического контроля: продольного и взаимноперпендикулярного профилирования на одной или различных равновеликих базах; вертикального акустического зондирования с тремя возможными вариантами (смещение ударника, смещение приемника, смещение ударника и приемника одновременно и симметрично); кругового зондирования. Продольное акустическое профилирование также выполняется в трех вариантах, а именно: направления базы и профилирования совпадают; направления базы и профилирования взаимноперпендикулярны; направления базы и профилирования расположены под произвольным углом, например, профиль направлен вдоль выработки, а прозвучивание производится вдоль или перпендикулярно слоистости пород, не совпадающей с направлением выработки. Продольное акустическое профилирование может выполняться вдоль криволинейного профиля, например, вдоль арочной крепи, вдоль растрела или армировки в шахтном стволе. Детальность контроля (шаг, база) определяются горной задачей и конкретными горно-геологическими условиями, их изменчивостью. Методические параметры диагностики отрабатываются в ходе экспериментальных исследований и ограничиваются необходимой достаточностью. Устойчивость крепи

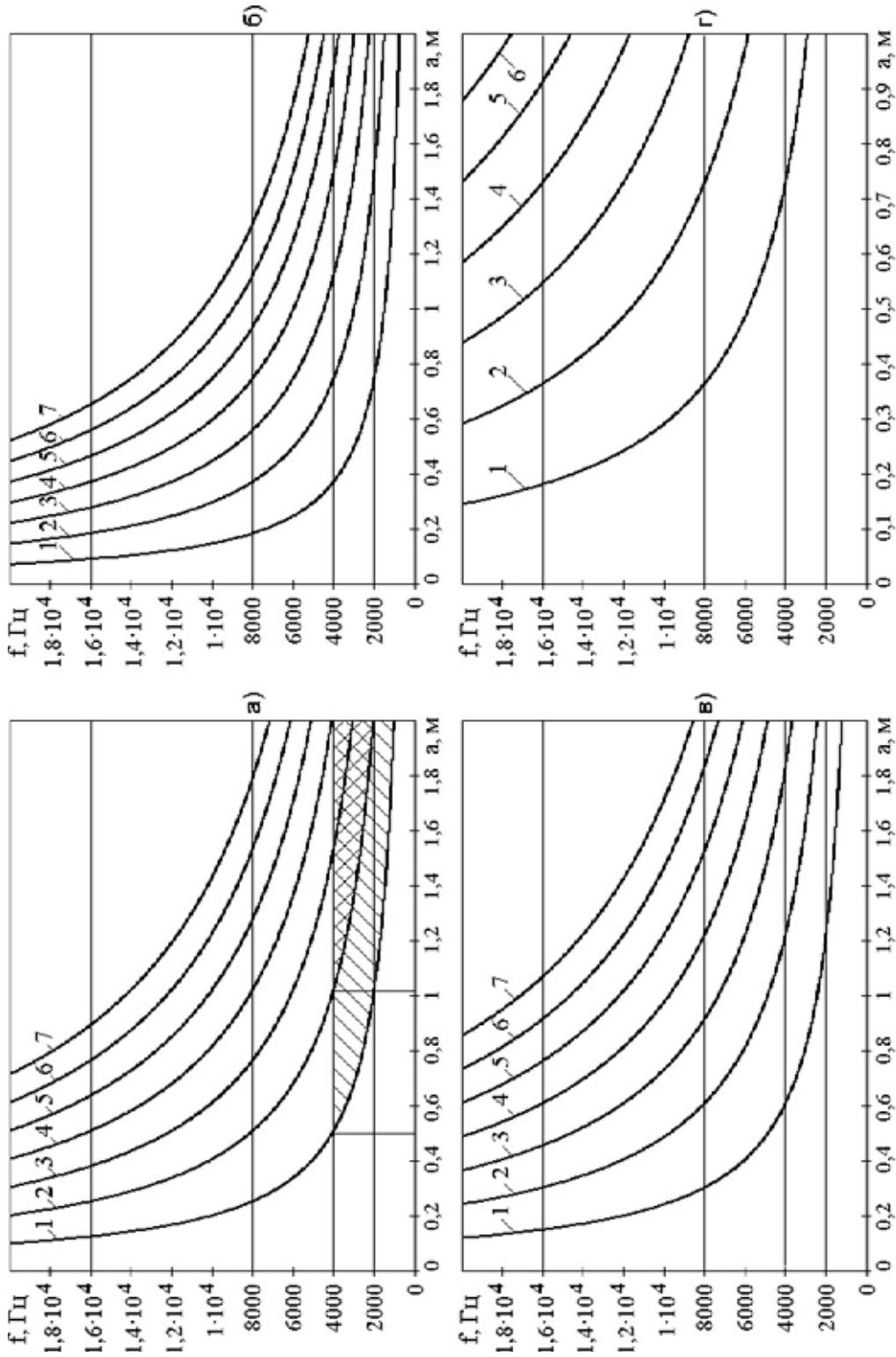
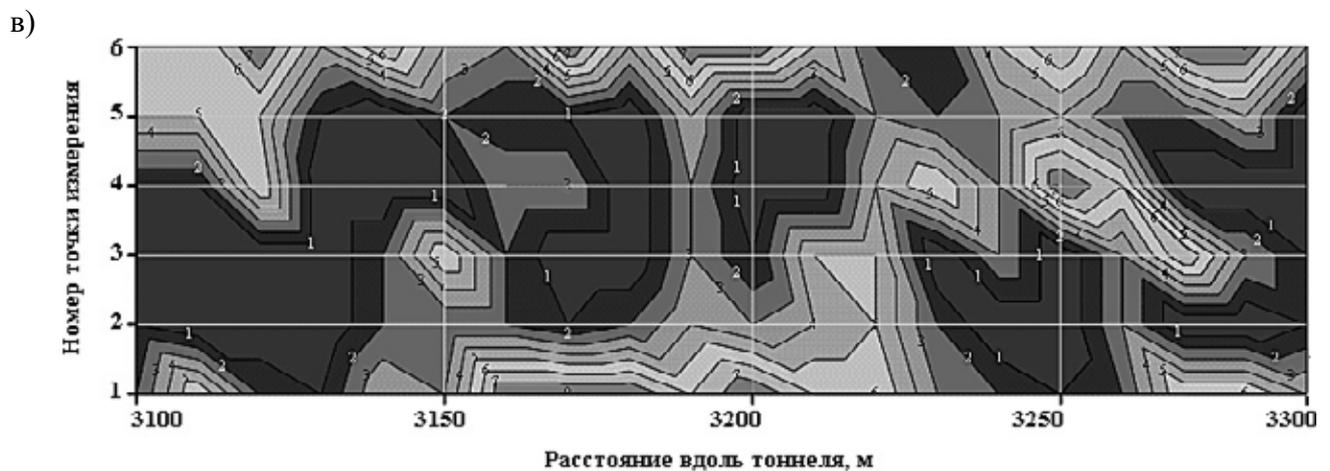
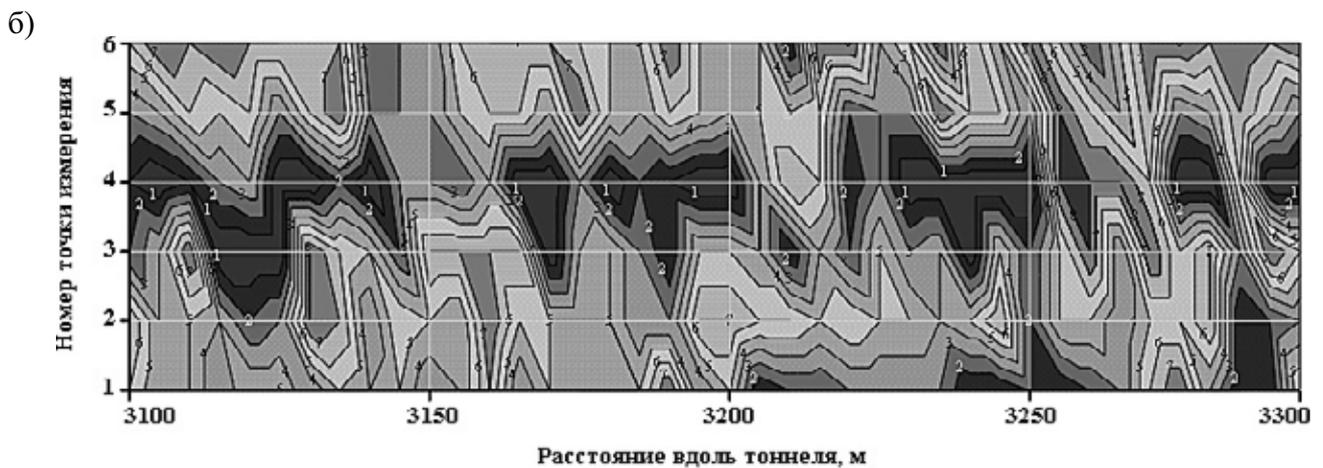
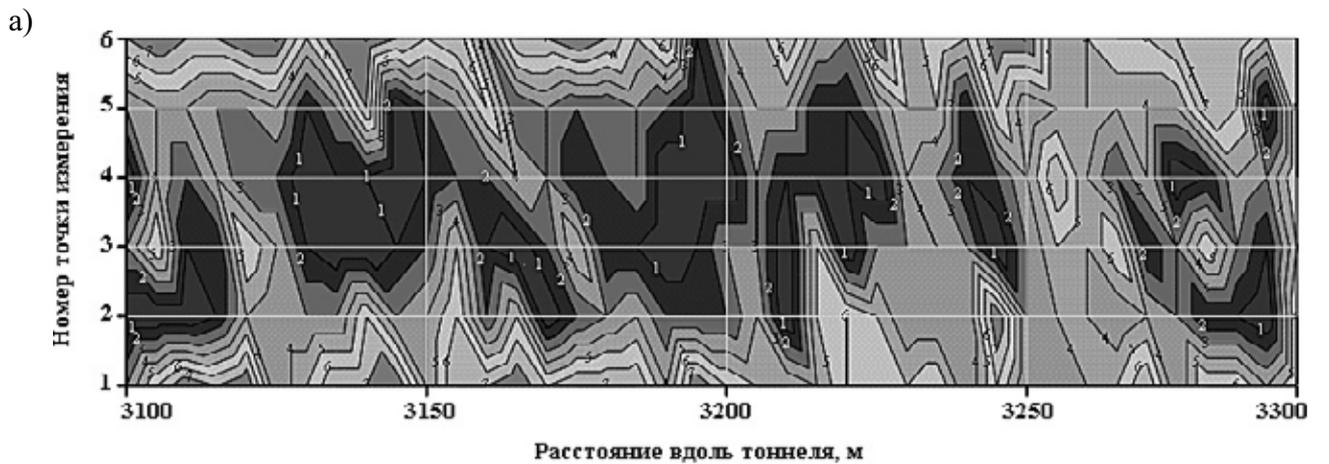


Рис. 2 – Зоны акустической слышимости нормальных резонансных мод с использованием октавных пропускающих фильтров низких частот для плоскопараллельных структур различных материалов (частоты среза фильтров обозначены горизонтальными сплошными линиями): а) бетон; б) аргиллит; в) гипс; г) железо

горной выработки можно оценить, простучав каждую десятую (двадцатую) арку один раз в полугодие, оценка же устойчивости отслоений и заколов для обеспечения безопасности горных работ требует ежедневного осмотра, остукивания, а в наиболее опасных местах и автоматизированного контроля с автоматическим оповещением степени опасности [4, 5].

Вертикальное акустическое зондирование по своей задаче совпадает с вертикальным электрическим зондированием, однако существенно отличается не только по физической сущности происходящих процессов, но и по методике его проведения и интерпретации результатов измерений. Если замена электродов А и В или М и N существенно не влияет на результаты измерений, то замена мест удара и приема акустических колебаний может полностью изменить результаты показания прибора на противоположные по сути, поэтому методика его проведения отличается от методики вертикального электрического зондирования. Однако, как и при электрометрическом контроле, его глубинность зависит от величины базы, оценка массива также преимущественно осуществляется в зоне приемника (при вертикальном электрическом зондировании в зоне приемных электродов MN), рис. 3. Следуя теоретическим предпосылкам только на достаточном расстоянии от излучателя (1-10 м) устанавливаются (отфильтровываются) нормальные поперечные волны достаточной амплитуды, частота которых определяется мощностями плоскопараллельных слоев, одной общей поверхностью которых является обнажение кровли или почвы пласта. Необходимость последовательного увеличения базы обусловлена более высоким затуханием высокочастотных составляющих спектра для нижних слоев, в особенности для слабопрочных глинистых пород непосредственной кровли угольных пластов и пород ложной кровли. Их высокое затухание может обуславливаться трещиноватостью, вызванной давлением от проведения горных работ или буровзрывной проходки выработок. Кроме того, разрешающая способность приборов оперативного экспресс-контроля позволяет надежно зафиксировать только два максимума на спектрограмме, в этой связи методический прием “вертикального акустического зондирования” с увеличением базы контроля на 0,5-1 м повышает разрешающую способность аппаратуры и достоверность контроля в целом. Замена точек возбуждения и приема акустических колебаний, в отличие от встречного профилирования, позволяет не только повысить достоверность контроля, но и произвести качественную оценку направления трещиноватости в заколе. Это связано с асимметрией процесса относительно излучателя и приемника при формировании нормальных волн разных частот в асимметрично зажатых блоках.

Глубинность контроля определяется мощностью ударного воздействия, чувствительностью и разрешающей способностью аппаратуры и расстоянием между точками возбуждения и приема колебаний (базой), рис. 3. База контроля должна быть не меньше толщины крепи или глубины приконтурного слоя контролируемого породного массива [5]. Характер отклика на ударное воздействие определяется резонансными явлениями в блоковых или плоскопараллельных структурах контролируемого участка и затуханием упругих колебаний в конструкциях или слоях среды. Дефекты конструкции, в частности полости внутри



а) база контроля вдоль туннеля – 5 м, масса ударника – 1 кг; б) база контроля по кольцу обделки – около 5 м, масса ударника – 1 кг; в) база контроля вдоль туннеля – 10 м, масса ударника – 2 кг

Рис. 3 – Изменение глубинности контроля нагруженности тоннельной обделки и заобделочных пустот туннеля № 2 канала «Днепр – Донбасс»

слоя или на границе слоев с различными свойствами, трещины, заколы и т.п. одновременно приводят к увеличению амплитуды и продолжительности свободных колебаний, что соответствует появлению в спектре резко выраженных резонансов и к повышению затухания в среде при распространении вдоль однородности слоя. Дефекты материала крепи, снижающие ее прочностные и упругие характеристики, проявляются в снижении амплитуды и длительности колебаний, смещении максимума спектральной плотности в сторону низких частот. Уменьшение связи между слоями слоистого материала крепи увеличивает амплитуду свободных колебаний и длительность колебательного процесса, но также смещает максимум спектральной плотности в сторону низких частот. Цельный, прочный материал достаточной жесткости отзывается на ударное воздействие на сравнительно высокой частоте, но переход колебательного процесса к волновому служит наиболее быстрым процессом переноса энергии, а, следовательно, приводит к быстрому затуханию колебаний и к значительному снижению амплитуды уже на малых расстояниях от источника колебаний (пропорционально квадрату радиуса за счет расхождения сферических волн и пропорционально радиусу за счет их затухания). Уменьшение механической связи между смежными элементами, например, бетонными кольцевыми заходками, бетонными или железобетонными блоками или тубингами приводит к значительному уменьшению амплитуды колебаний, регистрируемых по другую сторону границы относительно точки возбуждения.

Выполнению виброакустических измерений крепи стволов, капитальных и подготовительных выработок предшествует визуальный осмотр. При этом регистрируется наличие трещин на поверхности, заколов, вывалов и участков «выпучивания», разрушение затяжки, замков и участков металлической крепи. На участках со значительной асимметрией нагрузки, в зонах взаимного влияния сопряженных выработок виброакустика применяется для относительной оценки нагруженности крепи по различным направлениям в горизонтальной плоскости или в вертикальном направлении вдоль ствола [5]. На перекрепляемых участках шахтного ствола или горной выработки диагностика вводится в состав технологического комплекса по оценке качества выполнения ремонтно-строительных работ с целью определения неоднородности бетонной оболочки, степени ее связи с окружающим породным массивом, а при применении металлических и деревянных крепей – для контроля качества забутовки. При обследовании участков, где крепь имеет регулярную пространственную структуру (например тубинговая, рамная, арочная или анкерная крепь), определение информативного параметра выполняют для каждого из элементов.

Таким образом, выполнена идентификация блоковых плоско-параллельных структур контролируемых объектов (массива, крепи, элементов конструкций поземных сооружений) как объектов автоматизированного контроля. Предложено автоматизировать контроль элементов геомеханической системы на основе критерия квазистационарности колебательного процесса. Для структур различных материалов определены значения границ зон акустической слышимости нормальных резонансных мод с использованием пропускающих фильтров

низких частот и стадийность развития колебательного процесса. Рассмотрено влияние базы виброакустического контроля на его глубинность и детальность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 432 с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
4. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Пер. с англ. В 2-х кн. – М.: Мир, 1987. – Т. 1. – 447 с. – Т. 2. – 400 с.
5. Гликман А.Г. Оценка и диагностирование межслоевых контактов в угленосной толще // Горная геофизика: Материалы Всесоюзного семинара. – Тбилиси, 1989. – Ч. 1. – С. 149-150
6. Руководство по геофизической диагностике состояния системы «крепь - породный массив» вертикальных стволов: Дополнение к «Пособию по восстановлению крепи и армировки вертикальных стволов. РД.12.18.073-88» / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, А..А. Яланский и др.: Донецк: ООО «Лебедь», 1999. – 42 с.

УДК 622.831

Е.А. Слащева

ОСОБЕННОСТИ ВВОДА И ОБРАБОТКИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ЭВМ

Розглянуто особливості прискореного відпрацювання розрахункових схем при вирішенні геомеханічних задач за допомогою персональних ЕОМ.

SINGULARITIES OF INPUT AND TREATING OF AN INPUT INFORMATION AT A SOLUTION OF THE GEOMECHANICAL TASKS WITH THE HELP OF PERSONAL COMPUTERS

The singularities of accelerated improvement of the design schemas are reviewed at a solution of the geomechanical tasks with the help of personal computers.

При проведении исследований с целью управления процессами проявлений горного давления эффективным и необходимым инструментом является персональная ЭВМ, которая необходима для выполнения громоздких вычислений, статистической обработки данных, построения графиков и таблиц, картирования, визуализации и преобразования форм представления, архивирования и хранения исходных геофизических, геомеханических и технологических данных, результатов расчетов, а также реализации регрессионных, структурных, потенциальных и других моделей расчета напряженного состояния породных массивов [1, 2].

Постановка конкретной задачи по оценке устойчивости подземного сооружения предусматривает соблюдение геометрических и физических критериев подобия по отношению к реальному сооружению. Геометрическое подобие определяется выбранным масштабом моделирования. Выделенный геометрический объём разбивается сеткой треугольных элементов, при этом производится её сгущение в местах ожидаемых высоких градиентов напряжений. Физическое