

**А.С. Вознесенский, В.В. Корякин, Я.О. Куткин,
Э.А. Эртуганова**

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ ПОРОД КРОВЛИ И АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НА УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ*

Выявлены закономерности влияния состояния кровли и ее анкерного крепления на информативные параметры, определяемые при их контроле методом анализа акустического отклика на ударное воздействие. Моделирование сталеполимерного анкера с закреплением в шпуре с помощью полимерных композитов (химических смол) осуществлялось методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics. В качестве выходной величины рассматривалась колебательная скорость на конце анкера. Задача решалась в двумерной осесимметричной постановке. Модель представляла собой прямоугольник высотой 200 м и шириной 100 м, высота и ширина выработки по 10 м. Длина анкера 2,0 м, диаметр 22 мм. Из шпура диаметром 40 мм выступала часть анкера длиной 20 мм, с которой соприкасался ударник. Модуль упругости E , коэффициент Пуассона, плотность были взяты из литературных источников. Рассмотрены три варианта свойств: ненарушенные массив пород и анкерное крепление; нарушенный массив; нарушенный полимерный композит. В расчетах была использована рэлеевская модель потерь, в которой один коэффициент α был принят равным нулю, а второй β менялся. Заданы нулевые начальные условия за исключением ударника, для которого начальная скорость равнялась 1 м/с, что имитировало удар по концу анкера. Графики зависимостей колебательной скорости от времени имели вид затухающей косинусоиды.

Ключевые слова: массив пород, анкер, крепление, информативные параметры, состояние, отклик, удар, неразрушающий контроль.

* Работа выполнена по плану научно-исследовательской работы № 109 в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки в сфере научной деятельности по заданию № 2016/113 за 2016.

Авторы выражают благодарность В.Б. Иванову за помощь в практической реализации прототипа устройства контроля анкерного крепления и кровли подземных горных выработок.

Введение

Неразрушающий контроль состояния кровли и ее крепления в подземных выработках был и остается одной из актуальных задач горного производства. С этой целью разработан и выпускается ряд устройств, основанных на различных принципах, описание которых можно найти, в частности, в [1, 2, 3]. В этих публикациях приведены данные о видах и принципах действия существующих и разрабатываемых устройств геоконтроля, назначением которых является объективная оценка и прогнозирование состояния массива пород и его крепления. К ним относятся: измерители акустической энергии, основанные на регистрации сигнала отклика на удар по поверхности тоннеля; многореперные скважинные устройства (экстензометры) с механическим измерением расслоения массива пород, с индуктивными преобразователями; ультразвуковые экстензометры; сигнализаторы расслоения пород. Отдельно выделены устройства контроля анкерного крепления: приборы для определения усилий вытягивания анкерного болта, ультразвуковые приборы мониторинга целостности анкерного болта, сигнализатор-оптоболт, анкеры с датчиками-тензометрами, приборы на основе использования высокочастотных радиосигналов, анкерные болты «страж», тензометрические анкеры.

В настоящее время ведутся работы по созданию новых, неразрушающих методов определения прочности и ресурса горных пород вокруг выработок. В [4, 5, 6] определяется прочность горных пород на основании ее взаимосвязи с акустической добротности. Разрабатываются приборы спектрального контроля анкерного крепления и пород кровли, основанные на анализе акустического отклика на ударное воздействие [7, 8]. Современная приборная база дает возможность создавать интеллектуальные устройства, позволяющие определять состояние контролируемых объектов непосредственно на месте без дополнительной обработки данных в лаборатории, что повысит оперативность и достоверность получаемых рекомендаций. В этой связи представляется необходимым провести анализ и обоснование информативных параметров, характеризующих состояние массива пород, кровли выработок и ее крепления.

Целью данной работы является выявление закономерностей влияния состояния кровли и ее анкерного крепления на различные информативные параметры, определяемые при их контроле методом анализа акустического отклика на ударное воздействие. Указанная задача решается с помощью компью-

терного моделирования с привлечением метода конечных элементов.

1. Постановка задачи компьютерного моделирования сталеполимерной анкерной крепи в кровле подземных выработок

Общие сведения о модели

Моделирование сталеполимерного анкера с закреплением в шпуре с помощью полимерных композитов (химических смол) осуществлялось методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics [9]. Эта система позволяет моделировать различные физические процессы совместно друг с другом на основе решения систем дифференциальных уравнений. В то же время интерфейс системы дает возможность задавать параметры моделей без сложных настроек дифференциальных уравнений, все это делается лишь при минимальном участие оператора. Необходимо лишь в интерфейсные окна внести данные о свойствах элементов модели и параметрах расчета. В нашем случае в разделе структурной механики [10] составлялся чертеж модели, задавались физические свойства составляющих элементов, описанные ниже, граничные и начальные условия, устанавливались режимы расчета: вид моделирования – переходный анализ (Transient analysis), длительность расчета 20 мс, шаг дискретизации по времени 2 мкс. Такой режим обеспечивал расчет 10 000 значений по времени, что было необходимо для последующего спектрального анализа. В качестве выходной величины рассматривалась колебательная скорость на конце анкера, соответствующая с точностью до постоянного множителя электрическому сигналу на выходе электродинамического сейсмоприемника скорости.

Геометрические построения

Последовательность подготовки системы к моделированию следующая. Задавалась размерность задачи. Она решалась в двумерной осесимметричной постановке. В этом варианте горизонтальная ось обозначалась r , а вертикальная z . Затем составлялся чертеж модели, он представлен на рис. 1, *a*. Начало координат располагалось в центре поверхности. Модель представляла собой прямоугольник высотой 200 м и шириной 100 м. С учетом осесимметричной задачи общая ширина модели составляла 200 м. Достаточно большие размеры были приняты, чтобы исключить попадание в область расчета по времени сигналов упругих волн, отраженных от границ модели. Выработка имела высоту и ширину по 10 м. Нижний край кровли находился на глубине 100 м от поверхности.

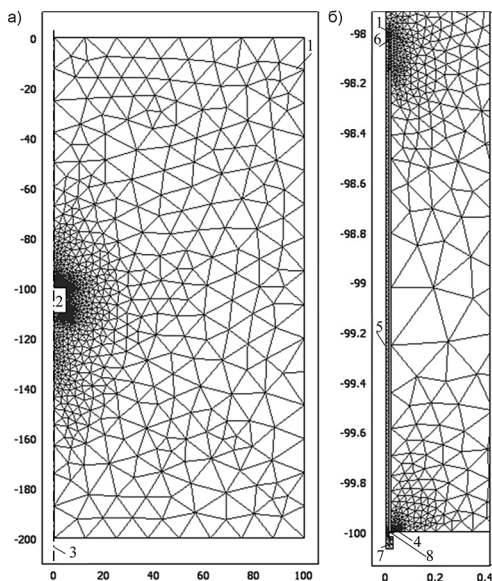


Рис. 1. Чертеж расчетной осесимметричной модели (а) и ее часть в области расположения анкера (б): 1 – массив пород; 2 – выработка; 3 – ось симметрии; 4 – шпур; 5 – анкер; 6 – полимерный композит для связи анкера с массивом пород; 7 – ударник; 8 – шайба

На рис. 1, б, показана часть модели в области анкера. Его длина 2,0 м, диаметр 22 мм. Из шпура выступала часть анкера длиной 20 мм, с которой соприкасается ударник. Анкер расположен в шпуре диаметром 40 мм. Таким образом, модель состояла из четырех элементов.

Свойства элементов модели

Исходные механические свойства элементов модели представлены в таблице как вариант 1. В этой таблице модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность были взяты из литературных источников как обобщенные величины для известняков, стали и полимерного композита. Кроме варианта 1 в ней содержатся также вариант 2, соответствующий нарушенному массиву, и вариант 3 – нарушенному полимерному композиту, связывающему донный конец анкера с массивом.

Относительно параметров затухания упругих волн необходимо сделать уточнения. В расчетах была использована рэле-евская модель потерь в механических системах [11], которая заложена в системе COMSOL Multiphysics как один из возможных вариантов их моделирования. Для такой модели величи-

Механические свойства элементов расчетной схемы

Элемент модели	Свойства	Ед. измерения	Вариант 1, ненарушенный массив	Вариант 2, нарушенный массив	Вариант 3, нарушен полимерный композит
Массив пород	Модуль упругости	ГПа	36	12	36
	Коэффициент Пуассона	—	0,2	0,15	0,2
	Параметр затухания рэлеевской модели $\beta_{дк}$	с	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$8,09 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$
	Плотность	кг/м ³	2400	2400	2400
Груз ударного устройства, анкер	Модуль упругости	ГПа	200	200	200
	Коэффициент Пуассона	—	0,33	0,33	0,33
	Параметр затухания рэлеевской модели $\beta_{дк}$	с	$3,18 \cdot 10^{-6}$	$3,18 \cdot 10^{-6}$	$3,18 \cdot 10^{-6}$
	Плотность	кг/м ³	7850	7850	7850
Полимерный композит	Модуль упругости	ГПа	30	30	1
	Коэффициент Пуассона	—	0,25	0,25	0,20
	Параметр затухания рэлеевской модели $\beta_{дк}$	с	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-6}$
	Плотность	кг/м ³	1300	1300	1300

на коэффициента демпфирования выражается формулой, состоящей из двух слагаемых, первое из которых характеризует увеличение затухания с уменьшением частоты, а второе — с ее увеличением. Она имеет вид

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{дм}}{2\pi f} + \beta_{дк} 2\pi f \right),$$

где ξ — коэффициент демпфирования, $\alpha_{дм}$, $\beta_{дк}$ — коэффициенты, характеризующие возрастание потерь в материале с уменьшением и увеличением частоты соответственно. Первое слагаемое играет роль при очень низких частотах и учитывается в сейсмологии, что выражается в увеличении добротности с ростом частоты [12, 13, 14]. В рассматриваемом диапазоне частот этой составляющей можно пренебречь, т. е. принять $\alpha_{дм} = 0$ и

рассматривать только коэффициент $\beta_{дк}$. Он может быть вычислен через значение коэффициента потерь и частоту, на которой этот коэффициент измеряется, как

$$\beta_{дк} = \frac{\xi}{\pi f_0} = \frac{\eta}{2\pi f_0} = \frac{1}{2\pi f_0 Q},$$

где η – коэффициент потерь, Q – добротность, f_0 – частота, на которой измеряются коэффициент потерь или добротность.

В нашем случае добротность известняка $Q = 65$ на частоте 2,8...10,6 кГц при продольном резонансе [15, 16]. Для определенности выберем частоту $f_0 = 10$ кГц. Коэффициент потерь на этой частоте $\eta = 1/Q = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $\beta_{дк} = \eta/(2\pi f_0) = 2,45 \cdot 10^{-7}$ с.

Добротность стали $Q = 5000$ на частоте 5–10 Гц для продольных волн [17]. Выберем для определенности $f_0 = 10$ Гц. Коэффициент потерь на этой частоте $\eta = 1/Q = 2,0 \cdot 10^{-4}$. $\beta_{дк} = \eta/2\pi f = 3,18 \cdot 10^{-6}$ с.

Значения упругих свойств, плотности и коэффициента $\beta_{дк}$ для полимерного композита было взято из обобщения различных данных, приведенных в публикациях, его величина также содержится в таблице.

В работе произведена оценка влияния на регистрируемые сигналы ослабления пород кровли, вызванного структурными изменениями в породе из-за увеличения трещиноватости, выветривания и т.д. Свойства, соответствующие нарушенному массиву пород, описаны в таблице как вариант 2. По данным [4] прочность известняков Тигинского месторождения при внесении поврежденности циклическим нагружением меняется от 50 до 12 МПа, т. е. более, чем в 4 раза, а добротность – от 50 до 15, т. е. более, чем в 3,3 раза. Поскольку коэффициент потерь и добротность связаны между собой в обратной зависимости, рассмотрено увеличение коэффициента $\beta_{дк}$ пропорционально снижению добротности в 3,3 раза, т.е. до $8,09 \cdot 10^{-7}$ с при неизменных потерях в стальном анкере. Соответственно в 3 раза до 12,0 ГПа был уменьшен и модуль упругости пород, поскольку увеличение их трещиноватости приводит к снижению и прочности, и модуля упругости. Эти значения, соответствующие ослабленному массиву пород, отражены в таблице как вариант 2.

Кроме того, как вариант 3 было рассмотрено влияние нарушений полимерного композита, сцепляющего донный конец анкера с массивом пород. В этом случае был уменьшен модуль упругости этого материала и увеличен частотный коэффициент затухания $\beta_{дк}$.

Граничные и начальные условия

В качестве граничных условий задачи заданы: левая граница модели как ось симметрии, ограничения на перемещения по оси r на правой и по оси z на нижней границах. Остальные границы свободны.

Для всех элементов заданы нулевые начальные условия, т.е. смещения и скорости равны нулю, за исключением ударника, для которого задана начальная скорость, равная 1 м/с, что имитирует удар по выступающему концу анкера. Вектор скорости направлен вдоль оси z вверх.

Результаты моделирования механических сигналов и спектров

Влияние свойств пород кровли на регистрируемые сигналы

Результаты расчетов колебательной скорости v_z в направлении оси z на конце анкера в точке с координатами $r = 0$, $z = -100,02$ м по вариантам 1 и 2 представлены на рис. 2. Толстой линией (*A*) здесь обозначена кривая, соответствующая варианту 1, а тонкой (*B*) – варианту 2. На кривых можно выделить несколько участков. Цифрой 1 обозначено начало кривой, ее максимальное значение, оно равно начальной скорости ударника. Затем следует участок 2, на котором наблюдаются колебания различных частот. Это колебание основной частоты, его период ориентировочно равен 0,83 мс, а частота 1,2 кГц. Кроме того, прослеживается еще одно колебание, частота которого в 3 раза выше, т.е. 3,6 кГц, но оно затухает быстрее, чем основное колебание. После этого выделяется участок 3, на котором присутствует затухающее колебание одной частоты около 1,2 кГц. В конце этого участка по 10 периодам определялась добротность по известным формулам

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{a_0}{a_{10}} \right),$$

$$Q = \frac{\pi}{\delta},$$

где δ – логарифмический декремент; N – количество периодов колебания; a_0 , a_{10} – амплитуды колебаний, разделенных 10-ю периодами, Q – добротность.

При сравнении между собой и анализе кривых на рис. 2 можно заметить, что максимальное значение сигнала (1 на рис. 2) при $t = 0$ одинаковое, оно равно 1 м/с, т.е. это начальная скорость ударника. Второе, что следует из сравнения кривых, то,

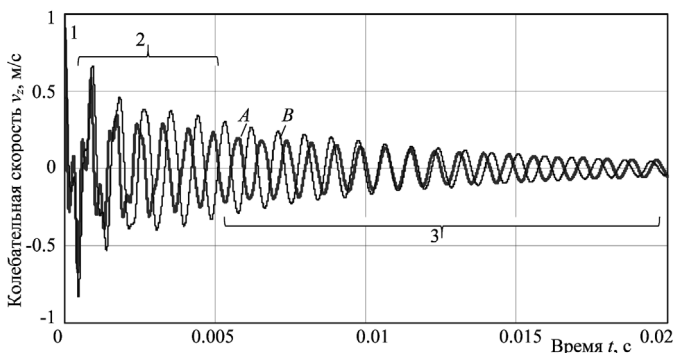


Рис. 2. Графики зависимости колебательной скорости v_z конца анкера от времени при параметрах массива пород ненарушенного $\beta_{дк} = 2,45 \cdot 10^{-7}$ с, $E = 36$ ГПа, вариант 1, $Q = 41,7$ (A) и нарушенного $\beta_{дк} = 8,09 \cdot 10^{-7}$ с, $E = 12$ ГПа, вариант 2, $Q = 25,6$ (B)

что большой пик в отрицательной области на графике A при времени около 1 мс имеет значение около $-0,63$ м/с, а на графике B — около $-0,8$ м/с, т. е. амплитуда кривой по второму варианту при повышенном затухании в геоматериале больше, чем по первому. Аналогичные соотношения наблюдаются и у последующих пиков. Такой результат может показаться странным, но он объясняется, если учесть, что во втором случае не только задавалось большее затухание, но и меньший модуль упругости горных пород. Т.е. анализ амплитуд позволяет сделать вывод о модуле упругости пород.

И, наконец, третье, что можно установить из анализа кривых, что при значениях времени, близких к 20 мс, соотношение амплитуд меняется, т.е. амплитуды сигнала по второму варианту меньше, чем по первому. Это объясняется повышенным затуханием во времени, обусловленным нарушением структуры пород кровли, вызванному трещиноватостью, выветриванием, воздействием влаги и другими причинами, приводящими к потере прочности. При этом повышенному коэффициенту $\beta_{дк}$ соответствует меньшее время затухания экспоненты, которой описываются затухающие колебания, и меньшая добротность Q . Поэтому оценка временного коэффициента затухания кривой отклика анкера на удар или добротности позволяет оценивать структурную нарушенность пород. По модельным сигналам были построены спектры.

На рис. 3 показаны спектры сигналов, рассчитанных по вариантам 1 (линия A) и 2 (линия B).

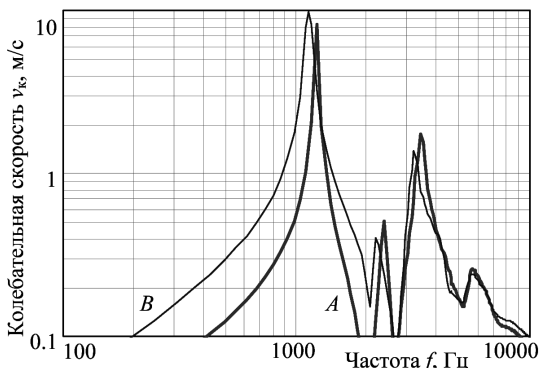


Рис. 3. Спектры сигналов колебательной скорости конца анкера при параметрах массива пород ненарушенного $\beta_{дк} = 2,45 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $E = 36 \text{ ГПа}$, $f_0 = 1220,9 \text{ Гц}$, $A_0 = 8,25 \text{ м/с}$ (A) и нарушенного $\beta_{дк} = 8,09 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $E = 12 \text{ ГПа}$, $f_0 = 1129,3 \text{ Гц}$, $A_0 = 9,9 \text{ м/с}$ (B)

При их сравнении можно также выделить несколько особенностей. Во-первых, здесь наблюдаются хорошо выраженные пики с частотами, близкими к 1,2; 2,4; 3,6 кГц. Колебание с частотой около 1,2 кГц наблюдается на всем протяжении сигнала вплоть до 20 мс. Более высокие гармоники (2,4 и 3,6 кГц) имеют большее затухание и сосредоточены при малых временах во второй области, показанной на рис. 2.

Во-вторых, в случае меньшего модуля упругости и повышенного затухания (кривая B) частоты пиков при варианте 2 сдвинуты в сторону низких частот. У пика кривой A при 1220,9 Гц амплитуда меньше, чем при варианте 2 у кривой B.

В-третьих, можно заметить, что полоса частот кривой B на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимума шире, чем в случае кривой A. По ширине этой полосы можно сделать вывод о затухании в породах и о добротности, чем затухание выше, а добротность ниже из-за нарушения, тем эта полоса шире.

Влияние нарушения полимерного композита

На рис. 4. для сравнения представлены графики сигналов колебательной скорости конца анкера в случае ненарушенной кровли и анкера (толстая линия A, вариант 1 в таблице) и в случае нарушения композитного полимера, служащего связкой между анкером и массивом (тонкая линия B, вариант 3).

Как и в предыдущем случае, период колебаний в нарушенной структуре возрастает, однако в отличие от него (рис. 2) на участке 2, где сказывается влияние волн, отраженных от конца анкера, амплитуда сигнала уменьшается из-за затухания в на-

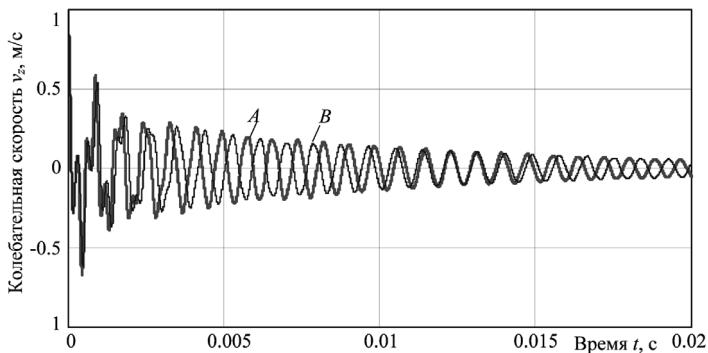


Рис. 4. Графики зависимости колебательной скорости v_z конца анкера от времени при параметрах полимерного композита ненарушенного $\beta_{dK} = 2,00 \cdot 10^{-7}$ с, $E = 30$ ГПа, вариант 1, $Q = 41,7$ (A) и нарушенного $\beta_{dK} = 6,00 \cdot 10^{-6}$ с, $E = 1$ ГПа, вариант 3, $Q = 42,4$ (B)

рушенном полимерном композите. Кроме того, по сравнению с ненарушенным полимерным композитом возрастает добротность. Это может быть объяснено тем, что добротность стального анкера гораздо выше, чем у массива пород, и когда связь между ними ослабла, общая добротность увеличилась.

На рис. 5 показаны спектры сигналов, рассчитанных для ненарушенного полимерного композита по варианту 1 (линия A) и нарушенного по варианту 3 (линия B).

Как следует из представленных графиков спектров, для нарушенного полимерного композита по сравнению с ненарушенным происходит смещение частоты спектрального макси-

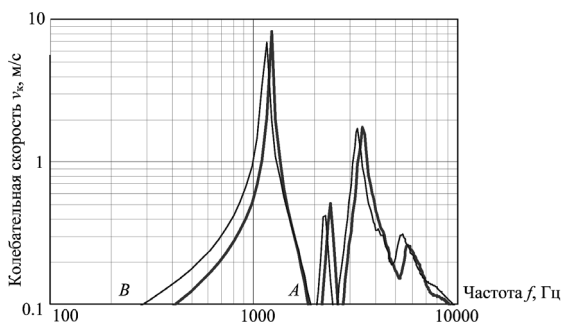


Рис. 5. Спектры сигналов колебательной скорости конца анкера при параметрах полимерного композита ненарушенного $\beta_{dK} = 2,00 \cdot 10^{-7}$ с, $E = 30$ ГПа, $f_0 = 1220,9$ Гц, $A_0 = 8,25$ м/с (A) и нарушенного $\beta_{dK} = 6,00 \cdot 10^{-6}$ с, $E = 1$ ГПа, $f_0 = 1159,3$ Гц, $A_0 = 6,86$ м/с (B)

муна в сторону более низких частот и уменьшение его амплитуды, однако эти изменения невелики (40 Гц или 5% и 1,39 м/с или 17%), что заставляет для измерения использовать методы и технические средства повышенной точности.

Сравнение с натурными результатами

В настоящее время проводятся работы по созданию устройства контроля кровли, использующего описанный принцип. На рис. 6 представлен один из сигналов (а) и его спектр (б), зарегистрированные при испытании на шахте Новомосковского месторождения гипса прототипа такого устройства контроля.

Для анализа используется «хвостовая» часть сигнала. Частота спектрального максимума около 800 Гц. Отличие этой величины от расчетных может быть объяснено отличием свойств пород на натурном объекте от тех, которые были заложены в расчет. Следует также отметить, что расчетные значения были близки к тем, которые были получены на лабораторных моделях.

В целом, можно отметить работоспособность данного метода и устройства, что подтверждается близостью полученных при расчете результатов и тех, которые были зарегистрированы при натурных испытаниях.

Обсуждение результатов

Как показали результаты моделирования, анкер, установленный в массиве пород, является, по существу, элементом измерительного устройства, позволяющего оценивать состояние пород кровли, в частности, их остаточную прочность. После проходки выработки и установки анкерного крепления происходит ослабление пород, сопровождающееся возрастанием затухания

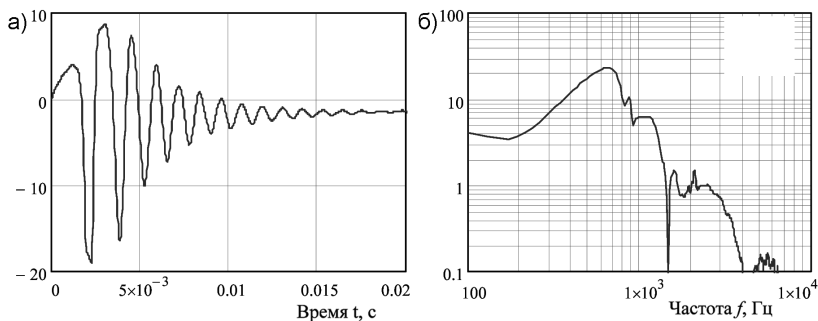


Рис. 6. Форма сигнала (а) и его спектр (б), зарегистрированные в натурных условиях, по оси ординат указаны условные единицы измерения

упругих колебаний, уменьшением первоначального значения добротности и модуля упругости. Это находит свое отражение на сигналах колебательной скорости, регистрируемой на выступающем из шпура или скважины конце анкера. Увеличение поврежденности пород кровли приводит к смещению спектрального максимума в область низких частот, уменьшению добротности установленного в массив анкера. Это влияние сказывается также и на амплитуде. Уменьшение модуля упругости окружающих пород приводит к увеличению амплитуд отклика, что также может служить для оценки остаточной прочности.

Ухудшение сцепления анкера с массивом пород может оцениваться по увеличению добротности и уменьшению частоты спектрального максимума и амплитуды отклика.

Для комплексной оценки состояния анкерного крепления и пород кровли в настоящее время разрабатывается приборное обеспечение, позволяющее регистрировать сигналы отклика анкера на ударное воздействие, измерять указанные параметры.

Заключение

При оценке состояния кровли подземных выработок и ее анкерного крепления следует оценивать нарушенность пород кровли и полимерного композита, служащего для связки донного конца анкера с массивом. Для оценки состояния кровли и ее анкерного крепления методом анализа отклика выступающего конца анкера на ударное воздействие следует измерять частоту и амплитуду спектрального максимума, а также акустическую добротность анкера, связанного с массивом пород. При анализе откликов следует учитывать, что при увеличении акустических потерь в породах кровли и полимерном композите частота спектрального максимума смещается в область более низких частот, а добротность системы «анкер-композитный полимер-массив пород» снижается. Уменьшение модуля упругости при увеличении нарушенности массива пород приводит к увеличению амплитуды отклика. Уменьшение модуля упругости композитного полимера при его нарушенности приводит к увеличению добротности системы «анкер-композитный полимер-массив пород». Диапазоны изменения частоты и амплитуды спектрального максимума не превышают 4–5% от измеряемых величин, что предъявляет повышенные требования к точности их измерения. Добротность может меняться в два раза, что говорит о ее более высокой чувствительности к изменению состояния массива пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Golder*, UK. Consulting, Design and Construction Services. [Электронный ресурс] // *Golder Associates* [сайт]. Режим доступа: <http://www.golder.co.uk/en/modules.php?name=Search&search=INSTRUMENTATION%20-%20INFORMATION%20SHEET> (дата обращения: 27.07.2015).
2. *Bigby D., Kent L.* Rock reinforcement and testing. Research report 241. Rock Mechanics Technology Ltd. Burton-upon-Trent. – 2004. – 161 pp. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr241.pdf> (дата обращения: 27.07.2015).
3. SCT: Strata Control Technology: Geotechnical Consultant and Instrumentation [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sct.gs/instrumentation/instrumentation.html> (дата обращения: 27.07.2015).
4. *Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A.* Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor // *International Journal of Fatigue*, 2015, Vol. 77, pp. 186–193.
5. *Вознесенский А. С., Куткин Я. О., Красилов М. Н.* Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – № 1. – С. 30–39.
6. *Voznesenskii A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A.* The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests // *International Journal of Fatigue*, 2016, Vol. 84, p. 53–58.
7. *Вознесенский А. С., Вознесенский Е. А., Корякин В. В., Красилов М. Н.* Принципы построения и перспективы развития устройств контроля массива горных пород и крепления вокруг выработок // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № 1. – С. 199–206.
8. *Вознесенский А. С., Корякин В. В., Вознесенский Е. А.* Физико-техническое обоснование ударно-спектрального метода контроля анкерного крепления пород // *Горный журнал*. – 2016. – № 2. – С. 17–20.
9. Официальный сайт COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] // Сайт российского отделения COMSOL Multiphysics. – URL: <http://comsol.ru> (дата обращения: 28.07.2015).
10. *Structural Mechanics Module User's Guide*. – Version: October 2007, COMSOL 3.5a.
11. *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*. – Version: October 2007, COMSOL 3.5a.
12. *Добрынина А. А., Чечельницкий В. В., Саньков В. А.* Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга байкальской рифтовой системы // *Геология и геофизика*. – 2011. – т. 52. – № 5. – с. 712–724.
13. *Aki K.* Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // *J. Geophys. Res.* 1969, 74. – P. 615–631.
14. *Aki K., Chouet B.* Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects // *J. Geophys. Res.* 1975. – 80. – P. 3322–3342.
15. *Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М.* и др. *Физические величины: Справочник* / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
16. *Born W. T.* // *Ibid.* – 1941, V. 6. – P. 132–139.
17. *Lindsay G.* // *Physical revue*. – 1914, V. 3. – P. 397–405. **ИИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Вознесенский Александр Сергеевич*¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: al48@mail.ru,
*Корякин Вячеслав Вячеславович*¹ — ассистент, e-mail: koryakin@inbox.ru,
*Куткин Ярослав Олегович*¹ — кандидат технических наук, ассистент, e-mail: kutnew@mail.ru,
*Эртуганова Эльмира Александровна*¹ — кандидат технических наук, доцент, e-mail: koryakin@inbox.ru,
¹ НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 10, pp. 167–181.

UDC 622.831:
542:34

A.S. Voznesenskiy, V.V. Koryakin, Ya.O. Kutkin, E.A. Ertuganova
ASSESSMENT OF PROPERTIES
OF ROOF ROCKS AND ROCK BOLTING CONDITION
BY THE METHOD OF THE ACOUSTIC
IMPACT-EFFECT RESPONSE

The aim of this article is to find mechanisms of influence exerted by the condition of roof and rock bolting on the monitoring information parameters using the method of the acoustic impact-effect response. Modeling of steel rock bolts with resin polymer grout used finite element method and COMSOL Multiphysics software. The output variable was the particle velocity at the bolt tip. The problem was plane axisymmetric. The model was a rectangle 200 m high and 100 m wide; the simulated excavation had equal height and width of 10 m. The rock bolt 2 m long had a diameter of 22 mm. From a hole with a diameter of 40 mm, a part of the rock bolt protruded and was exposed to hammer blow. Elasticity modulus E , Poisson's ratio and density were taken from reference literature. The scope of the analysis embraced three variants: variant 1—undamaged rock mass and rock bolting; variant 2—damaged rock mass; variant 3—damaged resin polymer grout. The calculations included the Rayleigh model with the damping coefficients α and β , the former assumed as zero and the latter variable. The initial conditions were set zero, except for the hammer with the preset initial velocity of 1 m/s to simulate a blow on the rock bolt. The particle velocity–time curves were decaying cosine functions. On the transition from undamaged state of variant 1 with $\beta = 2,45 \cdot 10^{-7}$ s and $E = 36$ GPa to damaged state of variant 2 with $\beta = 8,09 \cdot 10^{-7}$ s and $E = 12$ GPa, the acoustic Q-factor in the rock bolt–resin polymer grout–rock mass system decreased from $Q = 41.7$ to $Q = 25.6$ while the frequency and amplitude of the spectral maximum changed from 1220.9 Hz and 8.25 m/s to 1129.3 Hz and 9.9 m/s, respectively. The reduced frequency and the grown amplitude are related with the higher damping and lower elasticity modulus of rock mass. In the analysis of resin polymer grout upon the transition from variant 1 state with $\beta = 2,00 \cdot 10^{-7}$ s and $E = 30$ GPa to variant 3 damaged state with $\beta = 6,00 \cdot 10^{-6}$ s and $E = 1$ GPa, the Q-factor in the rock bolt–resin polymer grout–rock mass system increased from $Q = 41.7$ to $Q = 42.4$. The higher Q-factor with the damaged polymer resin grout is explained by the lesser damping effect of rock mass on the higher-quality steel rock bolt upon weakening of the contact between the rock bolt and rocks. The frequency and amplitude of the spectral maximum reduce for the damaged polymer resin grout as against its undamaged state.

Key words: rock mass, rock bolt, reinforcement, informative parameters, condition, response, blow, non-destructive testing.

AUTHORS

Voznesenskiy A.S.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: al48@mail.ru,

Koryakin V.V.¹, Assistant, e-mail: koryakin@inbox.ru,

Kutkin Ya.O.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant,
e-mail: kutnew@mail.ru,

Ertuganova E.A.¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: koryakin@inbox.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been accomplished under research project No. 109 in the framework of the basic part of the government research assignment No. 2016/113 in 2016 by the Ministry of Education and Science.

REFERENCES

1. Golder, UK. *Consulting, Design and Construction Services* // Golder Associates, available at: <http://www.golder.co.uk/en/modules.php?name=Search&search=INSTRUMENTATION%20-%20INFORMATION%20SHEET> (accessed: 27.07.2015).
2. Bigby D., Kent L. *Rock reinforcement and testing*. Research report 241. Rock Mechanics Technology Ltd. Burton-upon-Trent. 2004. 161 pp. URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr241.pdf> (accessed: 27.07.2015).
3. SCT: *Strata Control Technology: Geotechnical Consultant and Instrumentation*. <http://www.sct.gs/instrumentation/instrumentation.html> (accessed: 27.07.2015).
4. Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor. *International Journal of Fatigue*, 2015, Vol. 77, pp. 186–193.
5. Voznesenskiy A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no 1, pp. 30–39.
6. Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests. *International Journal of Fatigue*, 2016, Vol. 84, pp. 53–58.
7. Voznesenskiy A. S., Voznesenskiy E. A., Koryakin V. V., Krasilov M. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 1, pp. 199–206.
8. Voznesenskiy A. S., Koryakin V. V., Voznesenskiy E. A. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 2, pp. 17–20.
9. *Ofitsial'nyy sayt COMSOL Multiphysics. Sayt rossiyskogo otdeleniya COMSOL Multiphysics*. <http://comsol.ru> (accessed: 28.07.2015).
10. *Structural Mechanics Module User's Guide*. Version: October 2007, COMSOL 3.5a.
11. *COMSOL Multiphysics Modeling Guide*. Version: October 2007, COMSOL 3.5a.
12. Dobrynina A. A., Chechel'nitskiy V. V., San'kov V. A. *Geologiya i geofizika*. 2011, vol. 52, no 5, pp. 712–724.
13. Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *J. Geophys. Res.* 1969, 74, pp. 615–631.
14. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects. *J. Geophys. Res.* 1975. 80, pp. 3322–3342.
15. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Meylikhova (Physical quantities. Handbook. Grigor'ev I. S., Meylikhov E. Z. (Eds.)), Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p.
16. Born W. T. *Ibid.* 1941, V. 6, pp. 132–139.
17. Lindsay G. *Physical revue*. 1914, V. 3, pp. 397–405.