

УДК 622.831:542:34

А.С. Вознесенский, Я.О. Куткин, М.Н. Красилов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

Рассмотрена методика компьютерного моделирования сигналов в приемном преобразователе от трещин, образующихся в массиве горных пород и вызывающих акустическую эмиссию. Получены зависимости амплитуды электрического сигнала на выходе пьезопреобразователя от длины образующихся трещин, их ориентации и положения по отношению к трешиноватой приkontурной области массива пород вокруг выработок.

Ключевые слова: трещина, массив пород, приkontурная область, пьезопреобразователь, электрический сигнал, акустическая эмиссия.

При исследовании строения свойств и состояния различных сред и, в частности, горных пород в приkontурной области вокруг выработок, используются акустические методы, основанные на регистрации упругих волн, создаваемых естественными или искусственными источниками, прошедшими через среду. В качестве естественных источников, можно назвать трещины, при своем образовании или прорастании вызывающие акустическую эмиссию (АЭ). В качестве искусственных источников сигнала используются преобразователи, осуществляющие импульсное или гармоническое воздействие на исследуемую среду.

В настоящее время разработаны высококачественные измерительные средства и накоплен обширный экспериментальный материал, основанный на использовании источников, имеющих как искусственное, так и естественное происхождение. При интерпретации экспериментальных результатов выдвигаются различные гипотезы, объясняющие регистрируемое явление. Эти гипотезы требуют своего

подтверждения, что достигается путем, как модельных экспериментов, так и теоретическими исследованиями.

Большие возможности для решения этой задачи предоставляет использование специализированных программных продуктов для компьютерного моделирования. Так, например, в [1] моделируется сигнал колебательной скорости смещений в различных точках массива пород, возникающий от трещины, образующейся в приkontурной зоне массива пород вокруг подземного хранилища углеводородов. В [2] моделируются аналогичные сигналы от трещин, возникающих в конструктивных элементах камерно-столбовой системы разработки подземного рудника (целиках и кровле). Моделирование в одном и другом случаях осуществляется в среде Comsol Multiphysics.

Однако для получения картины, наиболее адекватной реальной ситуации, при моделировании следует учитывать не только особенности массива пород и образующихся в нем трещин, но и характеристики регистрирующей аппаратуры. Так, например,

в [3] моделируется работа электроакустического тракта дефектоскопа, включающего кроме среды распространения также излучающий и приемный преобразователи.

Аналитические расчеты, осуществляемые с этой целью, дают наиболее точное решение, но они могут описать сравнительно простые случаи, не всегда соответствующие сложным реальным объектам. Особенно это относится к моделированию упругих волн, возникающих от образующихся трещин. Сложность натурных объектов заставляет прибегать к расчетам с помощью метода конечных элементов.

Эти расчеты касаются, как правило, активных методов, основанных на использовании искусственных источников зондирующего сигнала, таких как излучающие пьезопреобразователи, различные вибраторы и т. д. В то же время необходимо моделирование акустической эмиссии, возникающей от образующихся, прорастающих трещин или от трения их берегов и позволяющей прогнозировать разрушение горных пород. Работы в этом направлении встречаются гораздо реже в силу более сложной постановки задачи. В данном исследовании ставится цель разработать технологию расчета, позволяющую моделировать такие процессы.

Другой целью работ, результаты которых приведены ниже, является обоснование методов проектирования систем пассивного акустического контроля напряженно-деформированного состояния приконтурной области массива горных пород. При этом необходимо учитывать весь процесс появления трещины, излучения упругих волн в массив, их прохождение через геосреду и прием пьезопреобразователем. Покажем возможности такой технологии на примере регистрации упругих волн, возни-

кающих от трещин, образующихся в высоконапряженных областях приконтурной области массива пород вокруг выработки круглого сечения.

1. Описание модели

Для установления особенностей сигналов, регистрируемых пьезопреобразователем на контуре выработки от образующихся трещин в массиве с нарушениями, разработана модель, представляющая собой участок массива пород от дневной поверхности до глубины 1000 м, ограниченный с трех сторон. Размеры расчетной области: ширина 100 м, высота 1000 м, центр круглой выработки радиусом 5 м расположен на глубине 900 м. Верхняя граница массива пород — свободная; нижняя жестко закреплена; на вертикальных границах задано отсутствие горизонтальных смещений.

Поскольку здесь рассматриваются как упругие волны, так и процессы в пьезопреобразователе, используется мультифизическое моделирование, включающее механический и пьезоэлектрический разделы. При расчете используется система дифференциальных уравнений механики в постановке двумерной краевой задачи.

Приемный пьезопреобразователь размещен сбоку в центральной части стенки выработки и имеет толщину 1 мм и ширину 20 мм, ось пьезочувствительности направлена горизонтально вдоль меньшей стороны, а широкие стороны ориентированы вертикально и моделируют расположение контактных проводящих слоев, с которых снимается напряжение. Пьезопреобразователь расположен на боковой стенке выработки. Механические свойства элементов модели (E — модуль Юнга; ρ — плотность) представлены в табл. 1.

В модели принятые меры по устранению отражений от ее границ. Длительность регистрируемого сигнала,

Таблица 1
Параметры расчетной модели

	E , ГПа	ρ , кг/м ³	β_{dk} , с
Массив горных пород (песчаники)	35	2400	3.5e-5
Пьезокерамика	см. табл. 2	7750	3e-5

представляющего интерес, значительно меньше времени прохождения упругой волны до краев модели и обратно. Кроме того, в модели введено дополнительное затухание упругих волн незначительное вокруг выработки и резко возрастающее к краям модели.

Величина частотного коэффициента затухания песчаников β_{dk} получена из экспериментов на образцах пород, ее значение указано в табл. 1. Этот коэффициент характеризует пропорциональное увеличение коэффициента затухания с частотой, обусловленное потерями и рассеиванием энергии упругих волн на неоднородностях и микротрешинах. Поскольку образцы выпиливались из целых, ненарушенных кернов, это значение не учитывает макротрешиноватость пород. Она моделируется с помощью трещин определенной длины, вносимых в виде внутренних границ линейной формы с различными граничными условиями. Для существующей или образавшейся трещины задается равенство нулю сдвиговых напряжений, что достигается при скольжении одной границы относительно другой. Необразовавшиеся трещины моделируются аналогично, но с той разницей, что берега сомкнуты и не перемещаются относительно друг друга, т. е. сдвиговые напряжения на их контуре не равны нулю. Такая постановка компьютерного эксперимента дает возможность не менять расчетную сетку, по которой производится разбивка модели на конечные элементы. Появление новой трещины

задается изменением граничных условий на ее берегах. В системе Comsol Multiphysics это задается с помощью режимов «free» и «roller», применяемых для необразовавшейся и появившейся трещин соответственно. Существующие трещины в процессе построения модели распределяются вдоль поверхности обнажения на глубину от 50 до 300 мм.

Пьезоэлектрические свойства керамики моделируются системой уравнений, связывающих между собой напряженность и смещение электрического поля, механические деформации и напряжения в следующей форме

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbf{s}_E \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{d}^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{d} \boldsymbol{\sigma} + \varepsilon_0 \varepsilon_{rt} \mathbf{E},\end{aligned}$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\sigma}$ – напряжения и деформации в пьезокерамике, E , D – напряженность и смещение электрического поля, d – матрица пьезомодулей, $\mathbf{s}_E = \mathbf{C}_E^{-1}$ – матрица, обратная матрице модулей упругости, ε_0 – электрическая постоянная, ε_{rt} – относительная диэлектрическая проницаемость пьезоматериала.

2. Методика расчета

В системе Comsol Multiphysics расчеты проводились в два этапа.

На первом этапе в модели для трещин, находящихся между источником АЭ и пьезоприемником, задавались граничные условия «roller», т. е. уже с самого начала они моделировались как существующие. Источник АЭ моделировался также трещиной, но с граничными условиями «free», т. е. это была трещина со сросшимися между собой берегами. Затем производился

статический расчет напряженно-деформированного состояния массива пород.

Полученные значения напряжений и деформаций брались затем в качестве начальных условий для расчетов второго этапа.

Перед расчетами второго этапа менялись граничные условия трещины-источника АЭ с «free» на «roller», а также менялся метод расчета со статического на анализ переходных процессов (Transient Analysis) во временной области.

На втором этапе расчета первые отсчетные значения, представляющие собой начальные условия и соответствующие нулевому моменту времени, соответствовали предыдущему состоянию массива, когда трещина-источник была сомкнута. Второе и последующие значения соответствовали трещине с измененными граничными условиями, берега которой уже имели возможность скольжения друг относительно друга, т. е. в данной модели трещина появлялась между первым и последующими отсчетами. Второй этап позволял получить временную форму сигнала АЭ, регистрируемого пьезопреобразователем.

При определении напряжения на выходе пьезопреобразователя рассчитывалась разность потенциалов между его большими сторонами, одна из которых при расчете соединялась с «землей». График зависимости напряжения на выходе пьезопреобразователя от времени показан на рис. 1. Максимальное значение модуля первого вступления достигается в момент времени $t_m = 0,69$ мс, что соответствует скорости распространения около 6160 м/с, что имеет вполне реальное значение для ненарушенных скальных горных пород, обладающих большим значением модуля упругости.

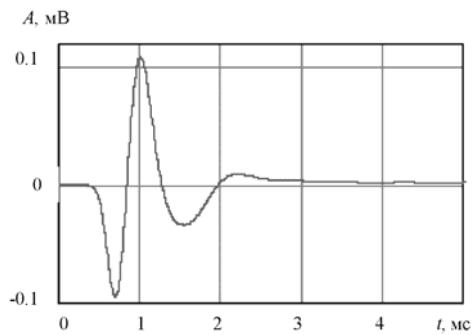


Рис. 1. Форма импульса напряжения на выходе пьезопреобразователя при возникновении трещины размером 4 мм на расстоянии 4,3 м от него и прохождении сигнала через трещиноватый массив

В компьютерном эксперименте моделировались зависимости максимального значения модуля первого вступления регистрируемого сигнала от размеров трещины l , от расстояния до поверхности обнажения, а также от трещиноватости участка пород между возникающей трещиной и пьезопреобразователем.

Рассмотрим полученные закономерности.

3. Результаты расчетов

3.1. Моделирование АЭ от трещин различной длины

В ряде экспериментальных работ показано, что зависимость амплитуды сигнала АЭ от длины образующейся трещины выражается зависимостью S . На рис. 2 представлены графики таких зависимостей для двух трещин. Одна из них находится ближе к обнажению массива пород, и распространение упругих волн от нее маскируется трещинами в приграничной зоне обнажения. Соответствующий график обозначен цифрой 1. Эта зависимость отличается от указанного выше закона. Для такой трещины увеличение амплитуды связано с выходом ее верхнего края за пределы

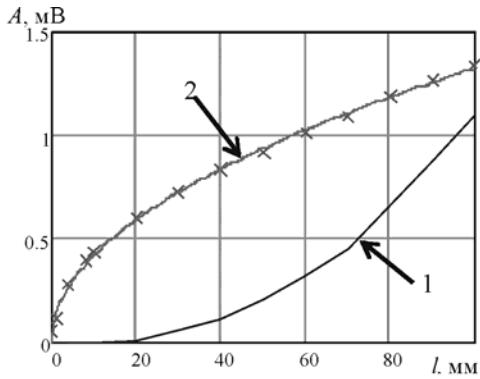


Рис. 2. Зависимость напряжения на выходе пьезопреобразователя от образующейся трещины различной длины:
1 – вблизи к контуру выработки, 2 – на расстоянии 500 мм от края выработки

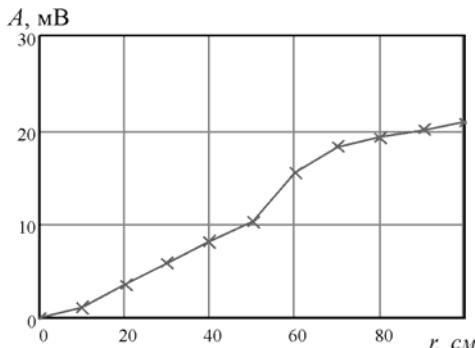


Рис. 3. Зависимость напряжения на выходе пьезопреобразователя от расстояния r от контура выработки при постоянной длине трещины $l=10$ мм

трещиноватой зоны, экранирующей упругие волны. Второй график обозначен цифрой 2 и он построен для трещины, находящейся на некотором удалении от поверхности обнажения.

Трещины приповерхностного слоя не оказывают маскирующего влияния, и зависимость амплитуды от длины трещины соответствует указанному выше закону. На рис. 2 «крестиками» показаны расчетные точки, а сплошной линией показана зависимость степени S , подобранная по этим экспе-

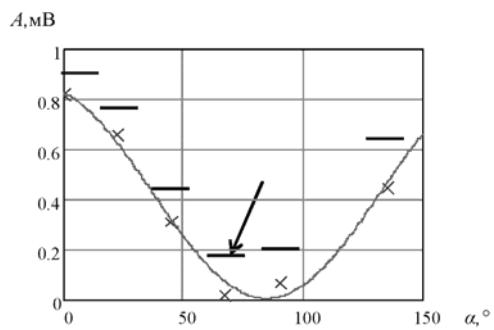


Рис. 4. Зависимость напряжения на выходе пьезопреобразователя от образующейся трещины постоянной длины, изменяющей свою ориентацию относительно выработки

риментальным точкам. Совпадение фактически идеальное, что подтверждает правильность составленной модели и ее валидность.

3.2. Зависимость амплитуды сигнала АЭ от удаленности трещины неизменной длины от контура выработки

Результаты расчета представлены на рис. 3. При расположении трещины-источника в непосредственной близости к контуру выработки сигнал АЭ на пьезопреобразователе практически равен нулю. Трещины приконтурной области полностью его экранируют.

При выходе из области трещиноватости происходит рост амплитуды A сигнала пьезопреобразователя в зависимости от удаления x трещины от контура выработки. При ее удалении на расстояние более 50 см экранирующее действие трещиноватого приконтурного слоя оказывается значительно меньше, и амплитуда A возрастает в большей степени.

3.3. Моделирование амплитуды сигнала АЭ в зависимости от ориентации трещины

Зависимость амплитуды принятого сигнала от ориентации тре-

шины приведена на рис. 4. Стрелкой отмечено положение трещины в направлении на пьезопреобразователь. Как видно из зависимости, уменьшение амплитуды A наблюдается в диапазоне от 0° до 90° углов наклона по отношению к направлению на пьезопреобразователь, затем при углах от 90° до 180° происходит увеличение амплитуды.

Дальнейшее снижение амплитуды будет наблюдаться при углах α со 180° до 270° , а рост с 270° до 360° , что не противоречит физическому смыслу регистрируемых явлений.

Выводы

1. С ростом длины l сигнальной трещины происходит рост амплитуды A электрического сигнала на выходе пьезопреобразователя, при этом для трещины, находящейся в глубине не нарушенного массива, зависимость амплитуды $A(l)$ описывается законом степени S , а для трещины, находящейся вблизи контура, оказывается экранирующее действие других трещин приконтурного слоя массива пород, что нарушает указанную зависимость.

2. При удалении на расстояние x сигнальной трещины от контура выработки происходит рост амплитуды A вначале по линейной зависимости из-за экранирующего действия других трещин, а затем, при выходе за пределы нарушенного слоя, по закону степени S от x .

3. При изменении ориентации α направления сигнальной трещины относительно направления на пьезоприемник амплитуда A изменяется, при этом изменение $A(\alpha)$ хорошо аппроксимируется синусоидальной зависимостью.

4. Полученные зависимости не противоречат закономерностям, описывающим распространение упругих волн от трещины, возникающей в массиве горных пород, что подтверждает правильность предложенной методики расчета, которая может быть использована при проектировании систем и устройств контроля приконтурной зоны массива пород, а также при интерпретации результатов измерений, осуществляемых пассивными акустическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский А.С., Эртуганова Э.А., Свиридов В.А. Моделирование сейсмических волн в массиве пород, вмещающем подземные хранилища газа // Сборник трудов Научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.В. Римского-Корсакова. - М.: ГЕОС, 2010. - 131-134 с.

2. Вознесенский А.С., Свиридов В.А., Эртуганова Э.А. Сейсмический контроль устойчивости целиков и кровли на руднике с камерно-столбовой системой разработки // Физическая акустика.

Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика. Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества". Т. I. - М.: ГЕОС, 2012. – 313-316 с.

3. Данилов В.Н. Программа компьютерного моделирования работы электоакустических трактов дефектоскопов «ИМПУЛЬС+». – Дефектоскопия, 2006, №3, с. 37-43. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вознесенский А.С. – профессор, доктор технических наук, кафедра «Физико-технический контроль процессов горного производства», al48@mail.ru

Куткин Я.О. – аспирант кафедры «Физико-технический контроль процессов горного производства», kutnew@mail.ru

Красилов М.Н. – студент 3 курса, ftkp@mail.ru

Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru