ГЕОАКУСТИКА И АТМОСФЕРНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.23

DOI: 10.29006/978-5-9901449-5-8-53

А.С. Вознесенский, Л.К. Кидима-Мбомби

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ИХ ТЕКСТУРЫ

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 4,
Тел.: 8 (499) 230-25-93, E-mail: al48@mail.ru*

Акустические свойства горных пород будут различаться в зависимости от их текстуры. В докладе рассматривается прохождение упругого импульса через насыщенные флюидом образцы пород различной пористости. Текстура пород формировалась с помощью эллипсов одинакового размера с заданным диапазоном ориентации включений относительно направления прозвучивания. Моделирование велось методом конечных элементов в двумерной постановке в среде COMSOL Multiphysics. В моделях кроме геометрии, обусловленной текстурой, задавались свойства слагающих ее твердых и жидких поровых включений. Получена модельная зависимость скорости продольных волн от коэффициента пористости образца горной породы.

Ключевые слова: горные породы, коэффициент пористости, скорость, P -волны, МКЭ

Введение

Согласно [1] текстура горных пород – характеристика степени и особенностей неоднородности горных пород, проявляющейся в форме, взаимном расположении и ориентировке минеральных агрегатов или стекловатых составных частей. Целью работы являлось создание численных моделей для исследования влияния текстуры и свойств горных пород на их акустические свойства.

Постановка задачи

Рассмотрена 2D МКЭ – модель среды в виде образца породы, состоящего из твердой матрицы и пор в виде эллипсов, распределенных по площади модели. В работе получена зависимость между количеством пор в образце горной породы и ее акустическими свойствами, определяемыми с помощью импульсного прозвучивания образца упругими волнами. Задача решена в среде Comsol Multiphysics. Прозвучивание описывается волновым уравнением с учетом затухания:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u) = f, \quad (1)$$

где e_a – коэффициент, характеризующий плотность; d_a – коэффициент потерь; c – матрица жесткости; f – сигнал прозвучивания.

Чертеж модели

Рис. 1. Чертеж модели.

Модель (рис. 1) представляет собой минеральную матрицу 1 с порами овальной формы, заполненными флюидом; пьезопреобразователи 2; а также держатели 3, закрепляющие образец в средней части для обеспечения условия свободных колебаний на верхнем и нижнем концах образца. Высота образца 64 мм, ширина и глубина 32 мм. Области, моделирующие поры, расположены по сетке 15×25 элементов. Этим областям задаются свойства флюида и минеральной матрицы в зависимости от требуемой пористости, которая рассчитывается как отношение суммарной площади пор к площади образца. Площадь образца определяется произведением высоты на ширину: $S_0 = ah = 0.064 \times 0.032 = 2.048 \times 10^{-3} \text{ м}^2$, где a , h – ширина и высота образца соответственно.

Поры в данной модели имели форму эллипсов с полуосями большей $R = 1$ мм и меньшей $r = 0,2$ мм. Площадь одной поры составила:

$$S_1 = \pi R r = 6.28 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2.$$

Коэффициент пористости рассчитывался по формуле:

$$K_n = S_n / S_0 = N_x N_y S_1 / S_0,$$

где K_n – коэффициент пористости; S_n – суммарная площадь пор; N_x, N_y – количество пор по горизонтали и вертикали соответственно. Так, например, при $N_x = 15$, $N_y = 25$ коэффициент пористости $K_n = 0.115$.

Физические свойства компонентов модели

Таблица. Представлены физические свойства элементов модели

Компонент модели	Модуль упругости E , Па	Коэффициент Пуассона, μ	Плотность, кг/м ³	Частотный коэффициент потерь, с
Минеральная матрица	$4 \cdot 10^{10}$	0.2	2400	$1 \cdot 10^{-6}$
Флюид	$1.38 \cdot 10^9$	0.000022	900	$3.77 \cdot 10^{-3}$
Пьезопреобразователи	$5.7 \cdot 10^{10}$	0.3	7750	$2 \cdot 10^{-6}$

Для моделирования различных значений K_n порам задавались различные свойства. Для $K_n = 0$ всем подобластям пор присваивались свойства матрицы. Для максимального значения $K_n = K_{n\text{макс}}$ всем порам присваивались свойства флюида. Для промежуточных значений K_n части пор присваивались свойства матрицы, а оставшейся части – свойства флюида.

Граничные и начальные условия, параметры расчета

На всех внешних границах задавались условия Неймана, т. е. они оставались свободными. На внутренней границе контакта преобразователя с образцом породы задавалось силовое воздействие в виде импульса давления прямоугольной формы, описываемой двумя единичными функциями Хевисайда в виде:

$$f(t) = 10^3 \cdot (flc1hs(t-0,tf) - flc1hs(t-tau,tf)), \text{ Па},$$

где $f(t)$ – силовое воздействие на границе пьезопреобразователя и образца породы; $flc1hs(t-tau, tf)$ – единичная функция Хевисайда в обозначениях системы Comsol Multiphysics; tau, tf – длительность импульса и длительность фронта – параметры функции Хевисайда; $tau = 1$ мкс; $tf = 0.5$ мкс.

Начальные перемещения, скорости и ускорения принимались равными нулю. Расчет производился в диапазоне времени от 0 до 1.4 мс с шагом 2.5 мкс. Время расчета одной модели составило около 10 мин. Были рассчитаны четыре модели с разным количеством пор, заполненных флюидом.

Результаты моделирования

На рис. 2 представлен пример одного из модельных импульсов. Время прохождения импульса от излучателя к приемнику измеряется от начала до абсолютного максимума первой отрицательной полуволны. Для более отчетливого изображения начальной части сигнала ниже представлены графики, растянутые по времени.

Рис. 2. Сигнал колебательной скорости на приемном преобразователе в случае ненарушенного образца (а) и образца с флюидами (б).

Рис. 3. Начальная часть сигнала колебательной скорости на приемном преобразователе в ненарушенном образце (а) и образце с флюидом (б).

Для ненарушенного образца задержка импульса $1.65 \cdot 10^{-5}$ с, скорость распространения продольной волны 3878 м/с. Для образца с флюидом задержка $2.2 \cdot 10^{-5}$ с, скорость распространения продольной волны 2909 м/с. Аналогично получены значения скоростей упругих волн для промежуточных значений K_{Π} . Зависимость скорости упругих волн от коэффициента пористости представлена на рис. 4. Она аппроксимируется формулой $V_{\Pi} = 2780 + 1100 \exp(-K_{\Pi}/0.563)$ м/с при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.9998$ и среднеквадратической погрешности $\gamma = 5.66$ м/с.

Рис. 4. Графики зависимостей скорости продольных волн от пористости, полученные с помощью численного (1) и аналитического (2) моделирования.

Из полученной зависимости следует, что при возрастании коэффициента пористости скорость в образце стремится к скорости упругих волн во флюиде, равной 2780 м/с.

Для сравнения на рис. 4 приведена часть аналогичной кривой, полученной Е.А. Марфиным и М.Н. Овчинниковым с помощью аналитического моделирования [2]. Обе кривые демонстрируют удовлетворительную сходимость.

Выводы

В среде COMSOL Multiphysics разработана модель образца горной породы с включениями в виде эллипсов для установления зависимостей между пористостью и скоростями продольных упругих волн. Модель показала свою работоспособность. Валидация модели показала удовлетворительную сходимость результатов моделирования численным методом с данными аналитического моделирования.

Литература

1. Горная энциклопедия / Под ред. Е.А. Козловского. М.: Советская энциклопедия, 1989. 623 с.
2. Марфин Е.А., Овчинников М.Н. Упругие волны в насыщенных пористых средах. Казань: Казанский университет, 2012. 28 с.

A.S. Voznesenskii, L.K. Kidima-Mbombi

NUMERICAL SIMULATION OF ACOUSTIC PROPERTIES OF ROCKS TAKING INTO ACCOUNT THEIR TEXTURE

National University of Science and Technology MISIS

Leninskii Prospect, 4, Moscow, Russia, 119991,

Tel.: 8(499)230-25-93, E-mail: al48@mail.ru

The acoustic properties of rocks will vary depending on their texture. The report discusses the propagation of an elastic impulse through fluid-saturated rock samples of different porosity. The texture of the rocks was formed using ellipses of the same size with a given range of orientation relative to the direction of sounding. The simulation was carried out by the finite element method in a two-dimensional formulation in the COMSOL Multiphysics software. In the models, in addition to the geometry determined by the texture, the properties of its constituent solid and liquid pore inclusions were set. A model dependence of the velocity of longitudinal waves on the porosity coefficient of a rock sample is obtained.

Keywords: rocks, porosity coefficient, velocity, P – waves, FEM

References

1. Mining encyclopedia. Ed. by E.A. Kozlovsky, Moscow: Soviet Encyclopedia, 1989, 623 p., (In Russian).
2. Marfin E.A. and Ovchinnikov M.N. Elastic waves in saturated porous media. Kazan: Kazan University, 2012, 28 p., (In Russian).