УДК 539.3

М.И.Кулак, доцент

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ЗЕРНИСТЫХ СРЕДАХ

Fractal approach have been used for description of the influence of deformation on processes of propagation of ultrasonics in powder systems.

Нахождение эффективных упругих свойств песчаных нефтегазовых коллекторов и, в частности, скоростей продольных и поперечных волн, определение связи между скоростями и структурными параметрами скелета и порового пространства, свойствами флюида является весьма актуальной задачей для сейсморазведки. Закономерности распространения звука в сухих грунтах и горных породах необходимо знать при регистрации силы землетрясений или взрывов. Эти и многие другие примеры показывают значимость решения рассматриваемой задачи для многих прикладных, а в некоторых случаях и теоретических проблем механики дисперсных систем.

Одним из наиболее разработанных в данной области направлением является направление, которое можно обозначить общим термином "фильтрационная консолидация" [1]. В рамках данного направления рассматривается уплотнение насыщенной пористой среды под действием сжимающей нагрузки за счет отжатия жидкости из пор. Объемные деформации отражают перераспределение напряжений между жидкостью и скелетом в процессе приспособления среды к новым внешним условиям.

Значительно реже рассматривается задача о распространении упругих волн в консолидированных зернистых или порошковых средах, не содержащих флюида. Существует несколько подходов к решению данной задачи, но зернистый характер скелета до последнего времени учитывался лишь в решениях, основанных на задаче Герца о деформировании двух шаров в точке контакта под действием приложенных сил. В рамках такого подхода получен ряд принципиальных и интересных результатов.

Вместе с тем необходимо отметить, что предположение о точечном контакте в начальный момент нагружения не отвечает условию консолидации системы и приводит к ситуации, когда упругие волны в такой модели распространяются лишь при наличии внешнего давления. Учет структурных характеристик дисперсных систем при решении данных задач пока что удавалось осуществить только с использованием регрессионных уравнений [2,3]. Причем в [2] такое уравнение практически построено методом множественной регрессии только для регулярных упаковок шаров одинакового радиуса.

Попытку получить выражение для определения количественного значения уменьшения скорости ультразвука в пористых порошковых телах предпринимал М.Ю.Бальшин в [4]. Однако он исходил из предположения, что в таких телах зависимости типа

$$E = \rho V^2 \qquad (1)$$

тоже справедливы. Сопроводив, правда, это предположение замечанием, что правильность экстраполирования такой зависимости на пористые тела вряд ли может вызвать серьезные возражения. Тем не менее, желательно все-таки зависимость типа (1) для пористых тел получить, а не закладывать ее сразу при определении коэффициента замедления. В рамках фрактальных представлений о структуре зернистых сред такая возможность появляется.

Скорость и длина пути упругой волны в компактном (сплошном) и пористом телах связаны между собой простым кинематическим соотношением

$$V_к / V = l / l_к. \qquad (2)$$

В теории фракталов достаточно хорошо разработана область исследований, связанная с диффузией и случайными блужданиями на фрактальных решетках [5]. Установлено, что диффузионный фронт в этом случае тоже имеет фрактальную структуру. В случае трехмерной фрактальной решетки топологическая фрактальная размерность фронта равна F=3. Множество траекторий ультразвуковых волн на исходном фрактальном кластере (прессовке) с размерностью D образуют некий гиперкластер с топологической размерностью H. Диффузионный фронт можно трактовать как пересечение этих двух фрактальных пространств. Фрактальная размерность подпространства пересечения равна [6]

$$F=D+H-d, \tag{3}$$

где d - топологическая размерность охватывающего пересечение пространства. Поскольку размерность подпространства пересечения равна F=3, размерность прессовки 3>D>2, то размерность гиперкластера больше 3 и, соответственно, размерность охватывающего пространства необходимо принимать равной d=4.

Размер области системы, в которой находятся частицы, доступные для возбуждения, определяется радиусом корреляции кластера

$$R \cong C\left|\Theta - \Theta_C\right|^{-\nu}, \tag{4}$$

где ν - критический индекс радиуса корреляции [7], константа C определяется из условий прохождения волны в компактном теле

$$l_K = C\left|1 - \Theta_C\right|^{-\nu}. \tag{5}$$

Определив из (5) C и введя обозначение

$$T = \left|(\Theta - \Theta_c) / (1 - \Theta_c)\right|, \tag{6}$$

представим (4) в окончательном виде

$$R = l_K T^{-\nu}. \tag{7}$$

Учитывая, что число частиц в кластере и его размер связаны между собой формулой $N=l^D$, получаем следующее выражение для длины пути волны в пористом фрактальном теле:

$$l = R^{H/d}. \tag{8}$$

Подставив (8) и (3) в (2), после учета значений F и d получим выражение для коэффициента замедления движения ультразвука в пористом теле по сравнению с компактным

$$V / V_K = l_K^{(D-3)/4} T^{(7-D)\nu/4}. \tag{9}$$

В тех случаях, когда необходимо решать обратную задачу - по известной скорости ультразвука в пористом теле определять модули упругости компактного тела из такого же материала, можно использовать следующую из (1), (9) и определения относительной плотности зависимость

$$E_K = E \cdot l_K^{(3-D)/2} T^{(D-7)\nu/2} / \Theta. \tag{10}$$

Легко убедиться, что для (9) и (10) выполняется предельный переход от пористого тела к компактному при $\Theta=1$ и $D=3$. Когда дисперсная система не консолидирована, т.е. при $\Theta<\Theta_C$, скорость волны и модуль упругости равны нулю. Поскольку анизотропия фрактальных кластеров не учитывается (как правило, она мала), то в рассматриваемом подходе подразумевается, что структурное замедление продольных и поперечных волн одинаково.

В работе [8] измерялась скорость продольных волн в уплотненном сухом песке. Песок помещался в трубку длиной L=200 мм, внутренним диаметром 5 мм. Средний размер частиц песка d=300 мкм. Скорость ультразвуковой волны 2900 м/с. Частота 3.6 кГц. Если считать, так, как это обычно делается при проведении сейсмических расчетов [9], что песок представляет собой кварц с плотностью 2650 кг/м^3, модулем Юнга 100 ГПа, то по формуле (1) получим скорость волны в монокристалле кварца, равной 6140 м/с. Таким образом, полученное в эксперименте значение относительной скорости 0.472.

Для получения теоретической оценки скорости по (9) воспользуемся приведенной в [9] формулой для относительной плотности уплотненного грунта, которая дает $\Theta \sim 0.74$. Фрактальная размерность соответствующей структуры D=2.834. Отношение L/d равно 700. Расчет по (9) дает значение относительной скорости, равное 0.494. Различие между теоретическим и экспериментальным значениями составляет около 5%, что позволяет считать результат удовлетворительным.

Зависимости (9), (10) могут найти практическое применение для определения по результатам измерений скорости распространения упругих волн в сухих и насыщенных порошковых и зернистых средах фрактальной размерности скелета и порового пространства, что позволит поднять информативность акустических методов неразрушающего контроля таких дисперсных систем и материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А.Г., Костерин А.В., Скворцов Э.В. Консолидация и акустические волны в насыщенных пористых средах.- Казань: Изд-во КГУ, 1990.
2. Заикин А.Д. Эффективные упругие модули зернистых сред// ПМТФ.1990, N1.- С.91-96.
3. Голиков Н.А., Заикин А.Д. Скорости упругих волн в консолидированных зернистых средах//ПМТФ.- 1992,N2.- С.127-130.

4. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. - М.: Металлургия, 1972.
5. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991.
6. Бойко В.Г., Могель Х.-Й., Сысоев В.М., Чалый А.В. Особенности метастабильных состояний при фазовых переходах жидкость-пар//Успехи физ. наук.- 1991, Т. 161, N2.- С. 77-111.
7. Соколов И.М. Размерность и другие геометрические критические показатели в теории протекания//Успехи физ. наук.- 1986, т. 150, вып. 2.- С. 221-255.
8. Зименков С.В., Назаров В.Е. Нелинейные акустические эффекты в песке//Акустический журнал.- 1992, т.38, вып.6.- С.1118-1120.
9. Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. -М.: Недра, 1986.