

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕНЗОРА УПРУГОСТИ ГЛИНИСТЫХ СЛАНЦЕВ ПО
ОГРАНИЧЕННОМУ НАБОРУ ИЗМЕРЕННЫХ СКОРОСТЕЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД**

И.О. Баюк*, Н.И. Дьяур*,**
(*ИФЗ РАН, г. Москва, **Университет Хьюстона, США)

Аннотация. Предлагается метод определения упругих свойств (полного тензора упругости) анизотропных глинистых сланцев по ограниченному набору измеренных скоростей, недостаточному для применения стандартного подхода. Данный метод основан на использовании теории эффективных сред, позволяющей связывать измеренные физические свойства пород с их составом и внутреннем строением. В методе предполагается построение модели породы по данным о ее микроструктуре, параметризация модели и определение неизвестных параметров по имеющимся экспериментальным данным. Полученные параметры затем используются для определения полного тензора упругости породы. Применимость предложенного метода для решения поставленной задачи протестирована на лабораторных данных о скоростях продольных и поперечных упругих волн, измеренных в разных направлениях на образцах глинистых сланцев различных формаций. Продемонстрирована работоспособность метода при использовании данных акустического каротажа.

**RECONSTRUCTING THE SHALE STIFFNESS TENSOR FROM LIMITED
NUMBER OF MEASURED VELOCITIES WITH THE HELP OF EFFECTIVE
MEDIUM THEORY**

I.O. Bayuk*, N.I. Dyaur*,**
(*IPE RAS, Moscow, **University of Houston, USA)

Abstract. A method for determination of gas-shale stiffness tensor is suggested for the case when the number of velocity measurements is insufficient for application of the standard technique. The method is based on the effective medium theory that allows one to relate the measured physical properties of rocks with their composition and microstructure. The method requires a construction of rock's model from data on its microstructure, parameterization of the model, and determination of unknown parameters from available experimental data. The found parameters are further used for calculating the rock's stiffness tensor. The method has been tested in laboratory using data on compressional and shear wave velocities propagating in shale samples. The shales from different formations were selected for this study. The method is demonstrated to be successfully applied to reconstruct the shale's stiffness tensor from data provided by sonic logs.

В последнее время в связи с истощением запасов углеводородов в мировой разведочной геофизике все больше внимания уделяется так называемым нетрадиционным коллекторам. К таким коллекторам, в частности, относятся газовые сланцы. Однако эти породы обладают ничтожно малой проницаемостью, что приводит к необходимости проведения в них гидроразрыва для извлечения газа. В процессе проведения гидроразрыва необходимо осуществлять мониторинг положения

возникающих нарушений в среде (событий), в частности, с целью предотвращения возможного заводнения вышележащего пласта и попадания жидкости для гидроразрыва, с соответствующими химикатами, в водоносные слои. Помимо этого положение «облака событий» несет дополнительную информацию, важную для проведения последующих буровых работ в исследуемом регионе.

Для определения положения событий, возникающих при проведении гидроразрыва пласта, необходимо иметь надежную информацию о скоростях распространения упругих волн в среде. В силу своего строения (а обычно это осадочные горные породы с хорошо выраженной тонкой слоистостью) газовые сланцы обладают значительной анизотропией упругих свойств, что делает неприменимым использование для локации событий данных ГИС о скоростях упругих волн, полученных в вертикальных скважинах. Возможность определения скоростей в произвольно заданном направлении в анизотропной среде дает знание тензора упругости и плотности этой среды. Как правило, упругие свойства газовых сланцев относятся к гексагональному типу симметрии с вертикальной осью симметрии (трансверсально-изотропная симметрия). Тензор упругости таких сред имеет пять независимых констант, и скорости упругих волн в такой среде зависят от направления только в плоскости, перпендикулярной напластованию (полярной плоскости).

Одним из способов решения проблемы определения скоростей в газовых сланцах являются лабораторные измерения на образцах. Согласно стандартной методике, основанной на использовании уравнения Грина-Кристоффеля, для получения пяти независимых констант тензора упругости необходимо провести измерения скоростей в определенных заданных направлениях. Однако часто даже в практике лабораторного эксперимента возникает ситуация, когда невозможно провести измерения в некоторых направлениях, необходимых для определения полного тензора упругости по стандартной методике.

В данной работе предлагается метод определения полного тензора упругости глинистых сланцев по ограниченному набору измеренных скоростей, недостаточному для применения стандартной методике. Метод основан на применении теории эффективных сред (ТЭС), которая позволяет в аналитическом виде связать измеренные физические свойства с внутренним строением среды. Для применения этого метода на основе имеющихся данных о внутреннем строении породы строится ее модель, в которой частицы твердого вещества, поры и трещины моделируются эллипсоидальными включениями. При этом форма включений может меняться от тонких «монет» до сильно вытянутых «игл». ТЭС позволяет также учитывать характер связности включений. После построения модели породы производится ее параметризация. Зная параметры модели, с помощью ТЭС можно решать прямую задачу - определять полный тензор упругости, которой затем дает возможность определять скорости упругих волн в любых заданных направлениях. Если же скорости упругих волн в некоторых направлениях известны, то с помощью построенной модели на основе ТЭС можно решать обратную задачу по определению неизвестных параметров модели, которые должны обеспечивать приемлемое расхождение (невязку) теоретических и экспериментальных значений скоростей. Для минимизации невязки применяются методы нелинейной оптимизации. Тензор упругости, определенный по набору параметров, полученному таким образом, и является искомым.

Описанная выше методика определения полного тензора упругости сланцев была отестирована на данных лабораторного эксперимента. В лабораторных исследованиях скоростей упругих волн в газовых сланцах использовался ультразвуковой импульсный способ. Этот способ возбуждения и регистрации волн высокой частоты в сравнительно небольших образцах дает погрешность ($0.5 \div 1.0$ %) при расстоянии между датчиками

1÷10 см. В качестве источника и приемника упругих волн использовались ультразвуковые датчики Р- и S-волн с центральной частотой 1 МГц и с известной поляризацией S-волн. Регистрирующая аппаратура обеспечивала точность измерения времени распространения волны до 20 нс с помощью цифрового осциллографа с частотой дискретизации аналогового сигнала 50 МГц. Расстояние между датчиками определялось с точностью ± 0.01 мм. Образцы имели цилиндрическую форму. Длина оси цилиндра и диаметр образца составляли 25 – 30 мм. Образцы вырезались таким образом, чтобы ось цилиндра была параллельна напластованию. Такой способ изготовления образцов позволял измерять скорости, распространяющиеся в различных направлениях в полярной плоскости, но на одном и том же образце. В наших экспериментах проводились измерения скоростей продольных (V_P) двух сдвиговых (V_{S1} и V_{S2}) волн для углов 0° , 22.5° , 45° , 67.5° и 90° . Анизотропия скоростей подтверждалась как по разности времен пробега продольных волн, так и по расщеплению сдвиговых волн.

Модель газовых сланцев строилась на основе данных микроструктурного анализа и включала в себя информацию о содержании органического вещества, минеральном составе, пористости, наличии трещин, степени упорядоченности пластин глинистых минералов. При этом моделирование включало в себя несколько последовательных стадий и строилось по принципу «от мелких включений - к крупным».

Тестирование метода проводилось следующим образом. Измеренные скорости делились на две группы. Значения скоростей первой группы использовались для решения обратной задачи. Скорости второй группы не учитывались при решении обратной задачи, а использовались для сравнения с полученными после решения обратной задачи прогнозными значениями скоростей. Обратная задача по определению параметров моделировалась для различных наборов скоростей первой группы. Среди таких наборов были следующие: (1) скорости продольных и поперечных волн в плоскости напластования и перпендикулярно ей, (2) только скорости продольных волн в полярной плоскости, (3) скорости продольных и поперечных волн только перпендикулярно плоскости напластования. Последний случай наиболее интересен, поскольку является аналогом измерений скоростей в вертикальной скважине при условии, что плоскость напластования не является наклонной в земной системе координат. Во всех рассмотренных случаях расхождение измеренных скоростей, которые не участвовали в решении обратной задачи, изначений, полученных для них путем описанного выше теоретического прогноза, составляло первые проценты.

На основании успешно проведенных лабораторных тестов было предложено использовать данную методику для определения полного тензора упругости глинистых сланцев по данным акустического каротажа. Для продуктивной зоны формации газовых сланцев продемонстрировано хорошее согласие между тензором упругости, полученным в результате теоретического прогноза по предложенному методу, и соответствующим тензором, полученным на этом участке путем прямых измерений скоростей в скважинах (вертикальной, горизонтальной и наклонной).

Для использования полученных анизотропных упругих свойств для локализации событий на более низких частотах по сравнению с частотами акустического каротажа (несколько десятков килогерц) проводится апскейлинг (масштабирование) значений тензора упругости, полученного в виде непрерывного распределения тензора вдоль скважины. Для апскейлинга используется анизотропный вариант метода Бэйкуса. Приводятся результаты апскейлинга тензора упругости газовых сланцев для частот межскважинной томографии (100–300 Герц) и сейсмических частот.