



ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ОТ ГРАНИЦЫ С НИЗКОСКОРОСТНОЙ АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДОЙ

К.В. Федин^{1,2,3}, Ю.И. Колесников^{1,4}, Р.Н. Бейсембаев^{1,2}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,*

³*Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 2, Россия,*

⁴*Сейсмологический филиал федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН,
630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

e-mail: fedinkv@ipgg.sbras.ru

Проведено физическое моделирование упругих волн, отраженных от границы воды, и модели низкоскоростной азимутально-анизотропной среды, изготовленной с помощью печати на 3D-принтере. Результаты экспериментов показали, что при углах падения менее 25° коэффициенты отражения от азимута практически не зависят. При больших углах падения наблюдается азимутальная зависимость коэффициентов отражения, наиболее сильно проявляющаяся при азимутах от 45° до 75°. Результаты измерений в направлении слоистости хорошо согласуются с теоретическими коэффициентами отражения для границы изотропных сред.

Азимутально-анизотропная среда; коэффициенты отражения; физическое моделирование

PHYSICAL MODELING OF THE ELASTIC WAVES REFLECTION FROM THE BOUNDARY WITH LOW-VELOCITY AZIMUTHALLY ANISOTROPIC MEDIUM

K.V. Fedin^{1,2,3}, Yu.I. Kolesnikov^{1,4}, R.N. Beysembaev^{1,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 2, Russia,*

⁴*Seismological Branch of the Federal Research Center of Unified Geophysical Service RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

e-mail: fedinkv@ipgg.sbras.ru

The physical modelling of elastic waves reflected from the boundary between the water and the model of low-velocity azimuthally anisotropic medium was carried out. The model of anisotropic medium was made using 3D printer. The results of experiments showed that the reflection coefficients are practically independent from the azimuth at the angles of incidence

less than 25° . At larger angles of incidence, the azimuthal dependence of the reflection coefficients is observed, which is most pronounced at azimuths from 45° to 75° . The results of measurements in the layering direction are in good agreement with the theoretical reflection coefficients for the boundary of isotropic media.

Azimuthally anisotropic medium; reflection coefficients; physical modelling

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая анизотропия, т. е. зависимость упругих свойств среды от направления распространения волн, может быть вызвана разными причинами: упорядоченным расположением зерен породообразующих минералов, тонкослоистой структурой горных пород, их трещиноватостью и т. д. В анизотропных средах от направления могут зависеть как скорости, так и затухание сейсмических волн. Хорошо известны также такие связанные с сейсмической анизотропией эффекты как расщепление поперечных волн на быструю и медленную, образование петель на индикатрисах лучевых скоростей SV-волн, зависимость коэффициентов отражения и преломления от анизотропных свойств граничащих сред и др. [Гольдин, 2008].

В последние годы повышенный интерес к проявлениям анизотропии горных пород связан с трещиноватыми коллекторами, которые могут содержать залежи углеводородов. Трещины в таких залежах в большинстве случаев имеют субвертикальную ориентацию, что обусловлено преобладанием вертикальных напряжений в горных породах над горизонтальными. Азимутальное направление такой трещиноватости является важной характеристикой трещиноватых коллекторов и должно учитываться на разных этапах проектирования разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений.

Породы с вертикальной трещиноватостью в первом приближении можно рассматривать как трансверсально-изотропную среду с горизонтальной осью симметрии (модель среды HTI) или азимутально-анизотропную среду. Поэтому на практике зависимость коэффициентов отражения от азимута может быть использована для определения направления преимущественной ориентации трещин погруженных коллекторов, например, с помощью методов AVO-анализа, разрабатываемых для азимутально-анизотропных сред [Lynn et al., 1996; Mallick et al., 1998; Jenner, 2002; Hall, Kendall, 2003; Нефедкина и др., 2011]. Для отработки и надежной верификации таких методов должны привлекаться данные моделирования, в том числе физического.

Для физического моделирования анизотропных сред используются как готовые материалы, обладающие в той или иной мере анизотропными свойствами, так и специально изготовленные при помощи различных технологий. Для моделирования тонкослоистых сплошных сред либо применяют готовые слоистые пластики, такие как гетинакс, текстолит и др. [Brown et al., 1991; Cheadle et al., 1991; Chang et al., 1994, 1995; Chang, Gardner, 1997; Chang, Chang, 2001; Mah, Schmitt, 2001], либо склеивают (например, эпоксидной смолой) пачки тонких пластин из стекла [Melia, Carlson, 1984], алюминия [Ebrom et al., 1990b] или других листовых материалов. Промышленные слоистые материалы достаточно однородны, но обычно характеризуются относительно невысокой степенью анизотропии. При кустарном же изготовлении тонкослоистых материалов трудно обеспечить их однородность, в частности, выдерживать постоянную толщину слоев склеивающего материала.

Еще один способ получения сплошного анизотропного материала для лабораторных экспериментов описан в работе [Luan et al., 2016]. Авторы смешивали порошки разных минералов с последующим их прессованием, получая таким образом образцы с микроструктурой, подобной природным сланцам. Технология изготовления таких образцов довольно трудоемка, и не очевидно, получаются ли они достаточно однородными после прессования.

Трещиноватые среды моделируются, как правило, пачками тонких пластин, например, из плексигласа, подвергнутых сжатию вдоль оси симметрии [Tatham et al., 1992; Ebrom et al., 1990a; Гик, Бобров, 1996]. Для изготовления более сложных моделей трещиноватых сред с контролируемой геометрией трещин предложена подобная технология, но с включением между пластинами плексигласа тонких пленок фольги с вырезами, имитирующими трещины [Караев и др., 2008]. К недостаткам таких моделей можно отнести некоторые технические проблемы, которые могут возникнуть при проведении экспериментов, что связано с необходимостью обеспечивать равномерное сжатие пластин.

Наконец, развивающиеся в последние годы технологии 3D-печати позволили создавать тонкослоистые модели с хорошо контролируемыми свойствами. По-видимому, первый опыт создания таких моделей описан в работе [Huang et al., 2016]. Нами для моделирования азимутально-анизотропной среды использована именно технология 3D-печати.

В опубликованных ранее работах по физическому моделированию отражения упругих волн от границ с азимутально-анизотропными средами в качестве последних использовались слоистые пластики типа гетинакса [Chang, Gardner, 1997] или текстолита [Mahmoudian et al., 2015; Malehmir, Schmitt, 2017]. Скорости продольных волн в этих материалах выше, чем в граничащих с ними средах, в которых распространялись падающие и отраженные волны. В данной работе приведены результаты физического моделирования отражения продольных волн от границы воды с низкоскоростной азимутально-анизотропной средой, то есть для случая, когда критические углы отсутствуют.

МОДЕЛЬ АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Учитывая особенности применявшейся нами методики проведения экспериментов, размеры образца материала, моделирующего азимутально-анизотропную среду, были выбраны относительно небольшими ($10 \times 10 \times 3$ см³). Образец был напечатан на 3D-принтере Raise3D N2 Dual методом послойного наплавления нитей акрилонитрилбутадиенстирола (ABS-пластика) толщиной 0.1 мм. Вертикальная слоистость моделировалась чередованием параллельных одной из боковых граней образца «двойных» вертикальных слоев толщиной 0.2 мм с разными упругими и плотностными свойствами. Структура образца схематически показана на рис. 1а.

В процессе печати при переходе от каждого законченного слоя к последующему ориентация нитей менялась с 45 на 135 градусов относительно краев слоя или наоборот, то есть нити в любых соседних слоях были ориентированы ортогонально (см. рис. 1б). Таким образом, структура материала слоев имела орторомбическую симметрию. Для моделирования азимутальной анизотропии (точнее, квазианизотропии) при печати производилось чередование пар слоев с разным расстоянием между соседними нитями в слое.

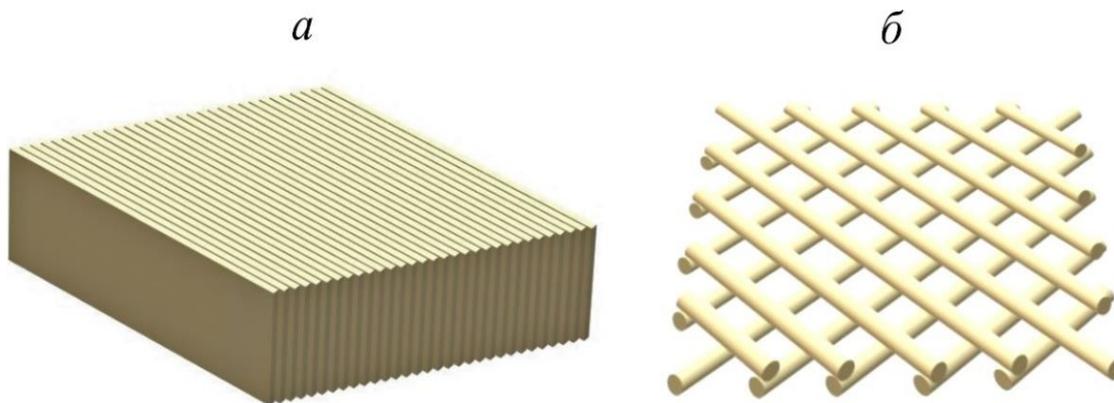


Рис. 1. Структура напечатанного на 3D-принтере образца азимутально-анизотропного материала (а) и схема расположения нитей пластика ABS в «двойных» слоях образца (б)

Половина «двойных» слоев печаталась без зазоров между нитями. Измеренная по контрольному образцу плотность такого «сплошного» материала составила 0.92 г/см^3 . Учитывая паспортную плотность пластика ABS (1.04 г/см^3), пористость этих слоев равна примерно 11.5 %. Для получения образца с относительно большими значениями коэффициентов анизотропии печать другой половины слоев программировалась с десятипроцентным наполнением нитями. Плотность готового слоистого образца составила 0.52 г/см^3 , из чего следует, что его пористость равна примерно 50 %, а пористость «разреженных» слоев близка к 88.5 %.

Такой комбинированный слоистый образец можно считать моделью породы с частично заполненными твердым материалом трещинами. Герметичность образца обеспечивалась напечатанным на поверхности всех граней «сплошным» слоем пластика толщиной 0.1 мм. При этом для минимизации влияния герметизирующего слоя на результаты экспериментов нити в нем на отражающей грани образца были ориентированы вдоль слоистости. Для контроля герметичности образец перед проведением экспериментов взвешивался на электронных лабораторных весах (точность 0.01 г) и затем выдерживался в воде примерно в течение суток. После этого производилось контрольное взвешивание образца, которое не показало заметного изменения его массы.

Измерения скоростей продольных волн в двух главных направлениях дали значения $V_{p1} = 1110 \text{ м/с}$ вдоль слоистости и $V_{p2} = 795 \text{ м/с}$ поперек слоистости. Для поперечных волн были получены следующие значения быстрой и медленной волн: $V_{s1} = 680 \text{ м/с}$ и $V_{s2} = 485 \text{ м/с}$. Таким образом, для данного образца коэффициенты анизотропии для продольных и поперечных волн оказались практически равными $x_p = x_s = 1.4$. Измеренная скорость продольных волн в воде составила 1502 м/с , плотность воды – 1 г/см^3 .

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика проведения экспериментов практически не отличалась от применявшейся ранее для определения коэффициентов отражения от границы воды с неидеально упругими средами [Колесников,

2005]. Схема экспериментов приведена на рис. 2а. Для варьирования углов падения/отражения использовалось рычажное устройство (рис. 2б), которое позволяло вращать источник и приемник ультразвуковых импульсов (далее датчики) на независимых рычагах фиксированной длины вокруг воображаемой оси, проходящей по плоской верхней границе исследуемого образца. При этом оси максимальной чувствительности датчиков были всегда ориентированы перпендикулярно к оси вращения рычагов.

При каждом измерении рычаги с датчиками устанавливались под одинаковыми углами к поверхности образца, в ходе получения экспериментальных данных о зависимости коэффициентов отражения от угла падения эти углы изменялись синхронно в противоположных направлениях с шагом 5°. Таким образом, при любых углах наклона рычагов центр отражающей площадки находился в одном и том же месте. Такая методика позволила минимизировать влияние диаграмм направленности датчиков на результаты измерений.



Рис. 2. Схема эксперимента (а) и конструкция рычажного устройства (б)

Датчики поршневого типа были изготовлены на основе пьезокерамических дисков толщиной 1 мм и диаметром 6 мм (источник) и 10 мм (приемник). Расстояние от оси вращения до источника составляло 64 мм, до приемника – 70 мм. Длина падающего на границу и затем отраженного от нее луча равнялась, таким образом, 134 мм. Для экранирования приходящей в первых вступлениях прямой волны между датчиками помещалась тонкая пластина из пенопласта. Вся конструкция вместе с образцом на время эксперимента помещалась в емкость с водой.

Для возбуждения в воде упругих волн на источник подавались прямоугольные электрические импульсы длительностью 1 мкс и амплитудой 60 В. Отраженные от границы вода–образец ультразвуковые импульсы преобразовывались приемником в электрические сигналы, которые после усиления регистрировались с помощью цифрового осциллографа В-423 и записывались на жесткий диск компьютера для последующей обработки.

Частота дискретизации аналоговых сигналов при оцифровке составляла 200 МГц. Для увеличения отношения сигнал/шум производилось 1000-кратное накопление сигналов. Пример экспериментальной сейсмограммы для азимута 45° приведен на рис. 3.

Как можно видеть из рисунка, в результате прямого и обратного электромеханического преобразования в пьезокерамических источнике и приемнике прошедшие через воду импульсы имеют вид затухающей синусоиды с преобладающей частотой около 1.8 МГц. Длина волны в воде на такой частоте составляет 0.83 мм, что примерно на порядок больше толщины нитей пластика, из которых напечатана модель. В низкоскоростном материале образца длины волн, естественно, меньше, но и в этом случае они в основном значительно превышают толщину нитей.

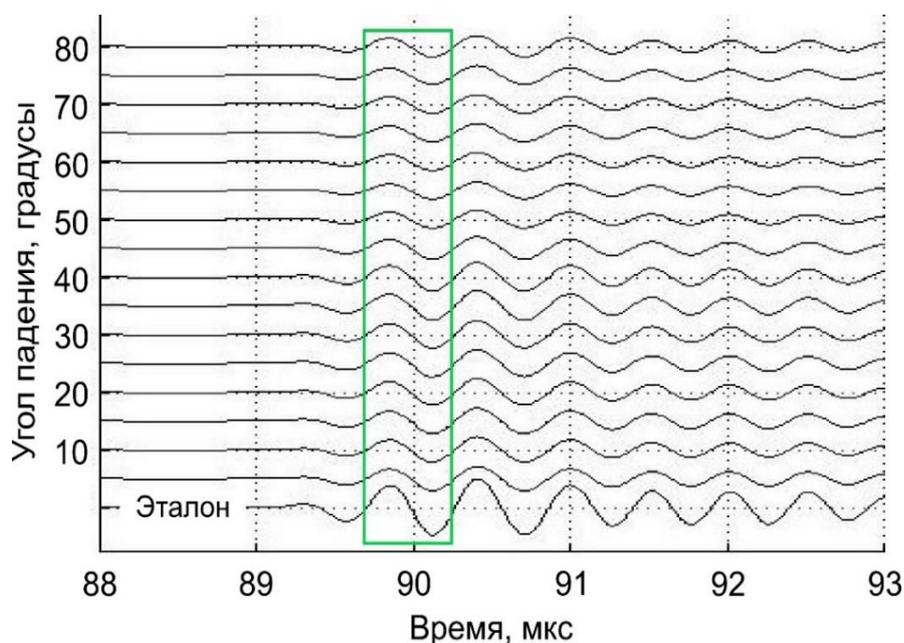


Рис. 3. Пример экспериментальной сейсмограммы для азимута 45°

При обработке экспериментальных данных для каждого угла падения измерялся размах отраженного сигнала (разность максимума и минимума) во временном окне, выделенном на рис. 3 зеленым контуром. Для вычисления модулей коэффициентов отражения размах каждого сигнала делился на размах «эталонной» прямой волны. За «эталонную» принималась прямая волна, зарегистрированная в воде в отсутствие образца при соосном расположении датчиков на расстоянии 134 мм, равном длине луча при регистрации отраженных волн. Таким образом, влияние геометрического расхождения на результаты измерений компенсировалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов были получены зависимости модуля коэффициента отражения от углов падения (в диапазоне от 5° до 80°) для азимутальных направлений плоскости падения от 0° (вдоль слоистости) до 90° (поперек слоистости) с шагом 5° по каждому из этих параметров. Графики зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения для некоторых азимутов приведены на рис. 4.

Как можно видеть, для углов падения меньше 25° модули коэффициентов отражения для разных азимутов практически не отличаются, но для больших углов наблюдается азимутальная зависимость этого параметра. Максимальные значения он имеет при азимутах, близких к 0° и 90° (это направления вдоль и поперек слоистости), при этом различия для этих азимутов в основном не превышают 15 %.

Максимальное же снижение модулей коэффициентов отражения в сравнении с этими азимутами (для некоторых углов падения более чем в 2 раза) наблюдается для азимутов 45–75°.

Полностью результаты, полученные для всех исследованных азимутов и углов падения, показаны в виде поверхности на рис. 5. Здесь также хорошо видно, что при относительно небольших углах падения модуль коэффициента отражения почти не зависит от азимута, в то время как при больших углах наблюдается сильная азимутальная зависимость этого параметра.

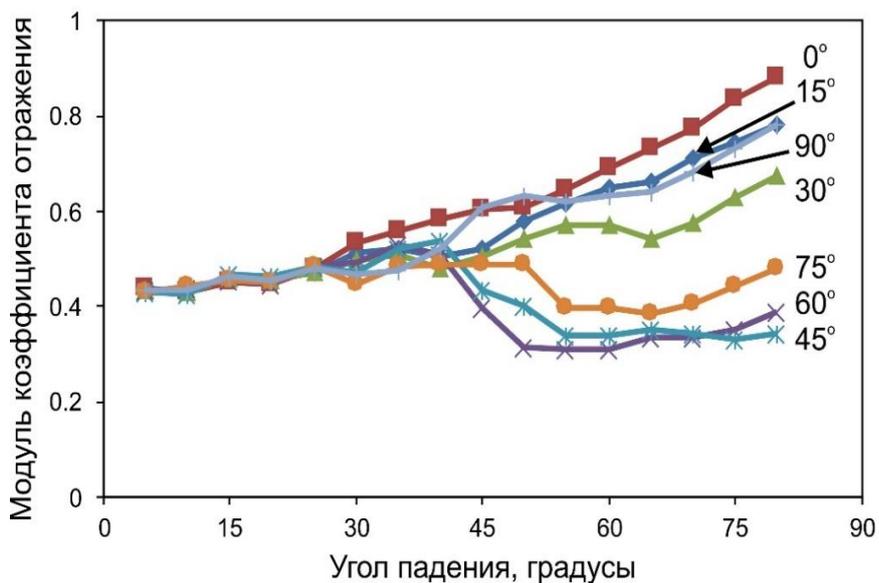


Рис. 4. Зависимости коэффициента отражения от угла падения на границу воды с азимутально-анизотропным образцом для некоторых азимутов плоскости падения относительно направления слоистости (0° – вдоль, 90° – поперек слоистости)

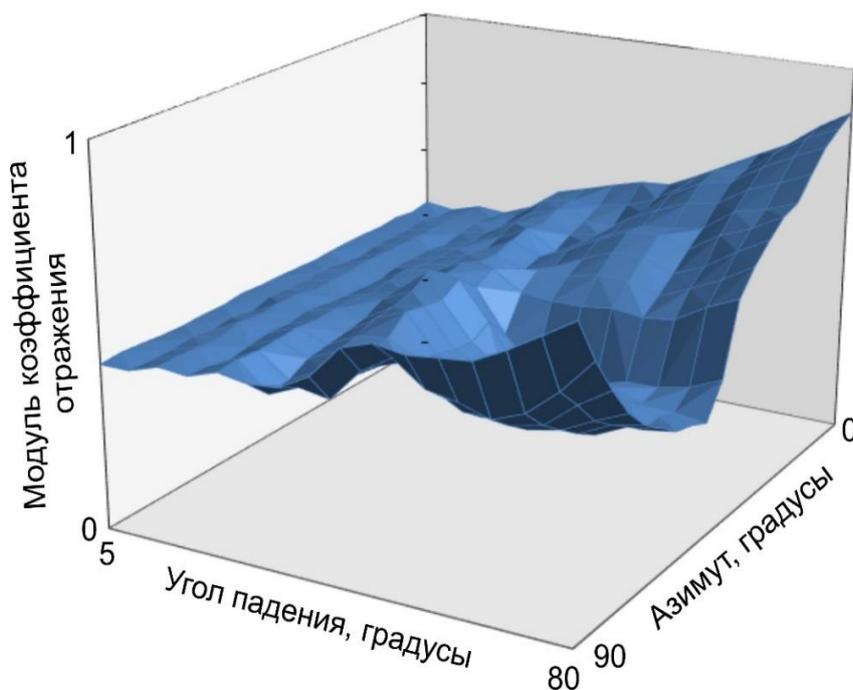


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от угла падения и азимута плоскости падения относительно направления слоистости (азимут 0° – вдоль, 90° – поперек слоистости)

Нужно заметить, что хотя коэффициенты отражения в направлениях вдоль и поперек слоистости близки, но характер их изменения вблизи этих направлений существенно отличается. При приближении азимута плоскости падения к направлению слоистости коэффициенты отражения меняются относительно плавно. В то же время азимут, совпадающий с осью симметрии, при больших углах падения характеризуется резкими пиковыми значениями коэффициента отражения. Кроме того, область пониженных значений коэффициентов отражения смещена к направлению оси симметрии.

Конечно, единичный эксперимент не позволяет делать какие-то серьезные обобщения. Однако, если отмеченные особенности характерны и для других анизотропных материалов, то это может быть использовано на практике для оценки направления оси симметрии низкоскоростной азимутально-анизотропной среды.

Интересно сопоставить полученные результаты с результатами экспериментов по отражению упругих волн от границы с высокоскоростной азимутально-анизотропной средой, приведенными в статье [Malehmir, Schmitt, 2017]. В этой работе исследовалось отражение ультразвука от границы воды и более высокоскоростного слоистого материала (текстолита). Как и в наших экспериментах, коэффициенты отражения слабо зависели от азимута при углах падения меньше примерно 25° .

Авторы предположили, что это следствие того, что для всех исследованных азимутов этот диапазон соответствует докритическим углам. Основные же изменения по результатам их экспериментов наблюдались как раз в области критических углов, которые для разных азимутов, естественно, отличались. С изменением азимута от направления слоистости к направлению оси симметрии эти углы увеличивались, соответственно монотонно смещались и пиковые значения модулей коэффициентов отражения.

В наших же экспериментах при падении упругих волн на границу более низкоскоростной среды критические углы отсутствуют, так как углы преломления в низкоскоростную среду меньше, чем углы падения и отражения. Тем не менее, если для углов падения меньше 25° полученные нами коэффициенты отражения для всех азимутов очень близки, то для больших углов наблюдается значительная зависимость коэффициентов отражения от азимута, причем эта зависимость имеет довольно сложный характер. А именно, изменение азимута от направления слоистости к направлению оси симметрии приводит сначала к уменьшению, а затем к увеличению модулей коэффициентов отражения почти до первоначальных значений. В этом коренное отличие нашей низкоскоростной среды от высокоскоростной, с которой проводились эксперименты, описанные в работе [Malehmir, Schmitt, 2017].

Кроме основного эксперимента нами был проведен контрольный, в процессе которого азимут плоскости падения изменялся от 90° до 180° . Так как эти наблюдения в идеале должны дать «зеркальный» результат по отношению к основному эксперименту, их результаты позволили оценить повторяемость измерений. Сравнение модулей коэффициентов отражения, измеренных на «зеркальных» азимутах, показало, что их отличия в основном не превышали нескольких процентов.

Известно, что если продольные и поперечные волны распространяются в плоскости изотропии и поляризованы в этой же плоскости, то явления отражения–преломления могут быть описаны так же, как в случае изотропных сред со скоростями соответствующих волн [Гольдин, 2008; Rüger, 1997]. В наших

экспериментах такой ситуации соответствует азимут 0° (а также 180° в контрольном эксперименте) и скорости в анизотропном образце $V_{p1} = 1110$ м/с и $V_{s1} = 680$ м/с.

Мы рассчитали зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения для этого случая, воспользовавшись компьютерной программой для плоских волн в изотропных средах из работы [Young, Braile, 1976], в которой запрограммированы формулы коэффициентов отражения из монографии [Červený, Ravindra, 1971, с. 63–64]. Заметим, что в наших экспериментах волны могут рассматриваться как практически плоские [Аки, Ричардс, 1983], так как расстояние от излучателя до площадки отражения превышает длину волны на преобладающей частоте в несколько десятков раз. Как можно видеть из рис. 6, расчетные и полученные нами экспериментальные коэффициенты отражения в целом хорошо согласуются.

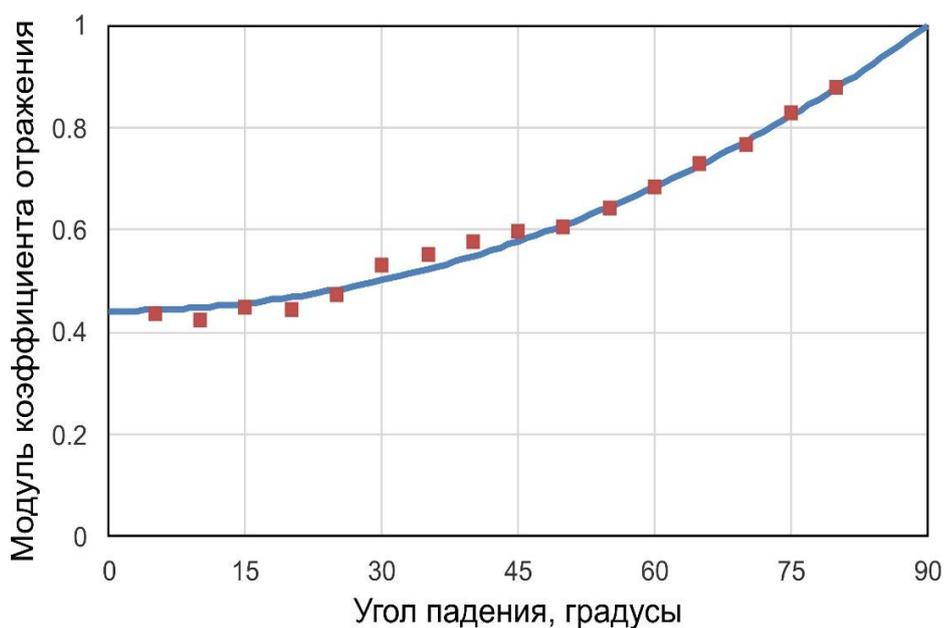


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (квадратные маркеры) и теоретических (сплошная линия) коэффициентов отражения для азимутального направления плоскости падения вдоль слоистости

Тем не менее, нужно сказать, что несколько пониженные относительно теоретических значения коэффициентов при углах падения 10° , 20° и повышенные значения в диапазоне от 30° до 45° наблюдаются как для азимута 0° , так и для «зеркального» азимута 180° . Возможно, эти регулярные отклонения связаны с орторомбической симметрией «двойных» слоев, из которых состоит образец.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология послойной 3D-печати с переменной плотностью заполнения слоев позволяет изготавливать образцы материалов с высокой степенью анизотропии. Образец, напечатанный на 3D-принтере из ABS-пластика, был использован нами для экспериментального исследования отражения ультразвука от границы воды с низкоскоростным азимутально-анизотропным материалом.

Проведенные эксперименты показали, что отражение упругих волн от тонкослоистой низкоскоростной среды с горизонтальной осью симметрии может зависеть от азимута довольно сложным образом. Если при относительно небольших (примерно до 25°) углах падения азимутальной зависимости коэффициентов отражения не наблюдалось, то при больших углах модули коэффициентов отражения в зависимости от азимута плоскости падения по отношению к направлению слоистости могут как возрастать, так и снижаться, причем довольно существенно.

В то же время модули коэффициентов отражения при ориентации плоскости падения вдоль и поперек слоистости отличаются незначительно, что может затруднить определение направления оси симметрии низкоскоростной азимутально-анизотропной среды по данным об отраженных от нее волнах. В этом коренное отличие низкоскоростной среды от высокоскоростной, на границе с которой коэффициенты отражения резко отличаются для этих двух азимутов в области критических углов. Тем не менее, особенности зависимости коэффициентов отражения от азимута, а именно пониженные значения их модулей в диапазоне азимутов от 45° до 75° , могут быть использованы на практике для оценки направления оси симметрии азимутально-анизотропной среды.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для тестирования алгоритмов и программ расчета волновых полей в средах с азимутально-анизотропными слоями, коэффициентов отражения для границ анизотропных сред, различных методов AVO-анализа и т. д.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования». Авторы благодарны сотруднику ИНХ СО РАН к.х.н. Д.Г. Самсоненко за помощь в изготовлении образца анизотропного материала.

ЛИТЕРАТУРА

- Аки К., Ричардс П.** Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1. – М.: Мир, 1983. – 520 с.
- Гик Л.Д., Бобров Б.А.** Экспериментальное лабораторное изучение анизотропии тонкослоистых сред // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37, № 5. – С. 97–110.
- Гольдин С.В.** Сейсмические волны в анизотропных средах. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. – 375 с.
- Караев Н.А., Лукашин Ю.П., Прокатор О.М., Семенов В.П.** Физическое моделирование трещиноватых сред // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 2. – С. 64–73.
- Колесников Ю.И.** Отражение ультразвуковых импульсов от границы воды с неидеально упругими средами: экспериментальные данные для случая наклонного падения // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8, № 1. – С. 91–97.
- Нефедкина Т.В., Карстен В.В., Егорова А.А.** Пространственный анализ амплитуд отраженных продольных волн в азимутально-анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 3. – С. 42–48.

- Brown R.J., Lawton D.C., Cheadle S.P.** Scaled physical modelling of anisotropic wave propagation: multioffset profiles over an orthorhombic medium // *Geophysical Journal International*. – 1991. – Vol. 107, No. 3. – P. 693–702.
- Červený V., Ravindra R.** Theory of Seismic Head Waves. – Toronto: University of Toronto Press, 1971. – 312 p.
- Chang C.H., Gardner G.H.F.** Effects of vertically aligned subsurface fractures on seismic reflections: A physical model study // *Geophysics*. – 1997. – Vol. 62, No. 1. – P. 245–252.
- Chang C.H., Gardner G.H.F., McDonald J.A.** A physical model of shear-wave propagation in a transversely isotropic solid // *Geophysics*. – 1994. – Vol. 59, No. 3. – P. 484–487.
- Chang C.H., Gardner G.H.F., McDonald J.A.** Experimental observation of surface wave propagation for a transversely isotropic medium // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60, No. 1. – P. 185–190.
- Chang Y.F., Chang C.H.** Laboratory results for the features of body-wave propagation in a transversely isotropic media // *Geophysics*. – 2001. – Vol. 66, No. 6. – P. 1921–1924.
- Cheadle S.P., Brown R.J., Lawton D.C.** Orthorhombic anisotropy: A physical seismic modeling study // *Geophysics*. – 1991. – Vol. 56, No. 10. – P. 1603–1613.
- Ebrom D., Tatham R., Sekharan K., McDonald J., Gardner G.** Hyperbolic travelttime analysis of first arrivals in an azimuthally anisotropic medium: a physical modeling study // *Geophysics*. – 1990a. – Vol. 55, No. 2. – P. 185–191.
- Ebrom D.A., Tatham R.H., Sekharan K.K., McDonald J.A., Gardner G.H.F.** Dispersion and anisotropy in laminated versus fractured media: An experimental comparison // 60th Annual International Meeting. Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstracts – 1990b. – P. 1416–1419.
- Hall S.A., Kendall J-M.** Fracture characterization at Valhall: Application of P-wave amplitude variation with offset and azimuth (AVOA) analysis to a 3D ocean-bottom data set // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68, No. 4. – P. 1150–1160.
- Huang L., Stewart R., Dyaar N., Baez-Franceschi J.** 3D-printed rock models: Elastic properties and the effects of penny-shaped inclusions with fluid substitution // *Geophysics*. – 2016. – Vol. 81, No. 6. – P. D669–D677.
- Jenner E.** Azimuthal AVO: Methodology and data examples // *The Leading Edge*. – 2002. – Vol. 21, No. 8. – P. 782–786.
- Luan X., Di B., Wei J., Zhao J., Li X.** Creation of synthetic samples for physical modelling of natural shale // *Geophysical Prospecting*. – 2016. – Vol. 64, Iss. 4. – P. 898–914.
- Lynn H.B., Simon K.M., Bates C.R., Van Dok R.** Azimuthal anisotropy in P-wave 3-D (multiazimuth) data // *The Leading Edge*. – 1996. – Vol. 15, No. 8. – P. 923–928.
- Mah M., Schmitt D.R.** Experimental determination of the elastic coefficients of an orthorhombic material // *Geophysics*. – 2001. – Vol. 66, No. 4. – P. 1217–1225.
- Mahmoudian F., Margrave G.F., Wong J., Henley D.C.** Azimuthal amplitude variation with offset analysis of physical modeling data acquired over an azimuthally anisotropic medium // *Geophysics*. – 2015. – Vol. 80, No. 1. – P. C21–C35.
- Malehmir R., Schmitt D.R.** Acoustic reflectivity from variously oriented orthorhombic media: analogies to seismic responses from a fractured anisotropic crust // *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*. – 2017. – Vol. 122, Iss. 12. – P. 10069–10085.

Mallick S., Craft K.L., Meister L.J., Chambers R.E. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from *P*-wave seismic data // *Geophysics*. – 1998. – Vol. 63, No. 2. – P. 692–706.

Melia P.J., Carlson R.L. An experimental test of *P*-wave anisotropy in stratified media // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49, No. 4. – P. 374–378.

Rüger A. *P*-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry // *Geophysics*. – 1997. – Vol. 62, No. 3. – P. 713–722.

Tatham R., Matthews M., Sekharan K., Wade C., Liro L. A physical model study of shear-wave splitting and fracture intensity // *Geophysics*. – 1992. – Vol. 57, No. 4. – P. 647–652.

Young G.B., Braile L.W. A computer program for the application of Zoeppritz's amplitude equations and Knott's energy equations // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1976. – Vol. 66, No. 6. – P. 1881–1885.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КОЛЕСНИКОВ Юрий Иванович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: физическое моделирование сейсмических волновых полей, пассивные сейсмические методы, e-mail: *kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru*

ФЕДИН Константин Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: физическое моделирование сейсмических волновых полей, пассивные сейсмические методы.

БЕЙСЕМБАЕВ Руслан Нуржанович – магистрант НГУ, кафедра геофизики. Область научных интересов: физическое моделирование сейсмических волновых полей, e-mail: *libyf@yandex.kz*.