

УДК 622.611.4:620179.16

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ОРТОТРОПНЫХ СРЕД

Лысенко П. Ю., Простяков Р. Г., Черепецкая Е. Б.,
Вдовин С. О.

(ГОУ ВПО МГГУ, г. Москва, Россия)

Для визначення модулів пружності ортотропних геосередовищ запропоновано імерсійний метод лазерної ультразвукової спектроскопії. Виміряно швидкості поширення поздовжніх і зсувних хвиль у сланці і розраховано коефіцієнти жорсткості даного геосередовища.

An ultrasonic method has been proposed for the determination of the elastic constants of orthotropic geomaterials with a laser source of ultrasound and wide-band registration of acoustic pulse. Longitudinal and transversal waves velocities have been measured and coefficients of schist stiffness matrix have been calculated.

1. Введение.

Исследование физических свойств и внутренней структуры горных пород является важным этапом в многочисленных задачах как фундаментального, так и прикладного характера. Актуальной становится расчетная оценка влияния совместных процессов деформирования и накопления повреждений геоматериала на процесс развития макроскопических нарушений сплошности породы (макротрещин), который приводит к значительному уменьшению ее прочности.

Наиболее чувствительными к изменению внутренней структуры геоматериала являются упругие свойства, связанные с такими структурными факторами, как трещиноватость, пористость,

распределение ориентации и формы образующих породу минералов. При этом упругие свойства однозначно связаны со скоростями распространения продольных и сдвиговых волн в горной породе, а коэффициент затухания данных волн дает дополнительную информацию о степени поврежденности геоматериала.

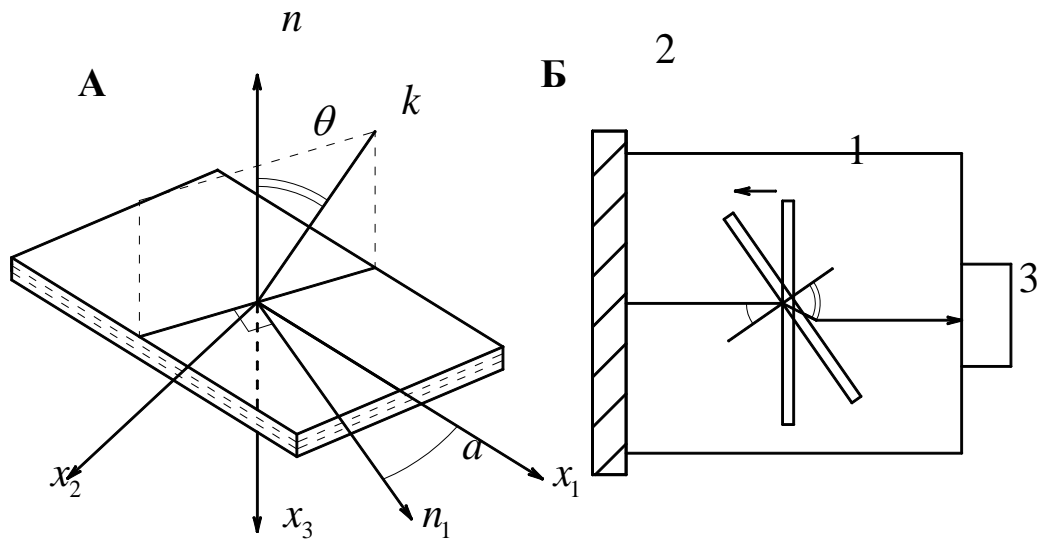
Наиболее полную информацию об упругих свойствах различных материалов (например, линейные и нелинейные коэффициенты жесткости) дают информативные параметры широкополосных ультразвуковых методов. Однако к настоящему времени данные методы используются, в основном, для металлов и композитов [1-9], и лишь частично для исследования свойств горных пород [10, 11].

В данной работе рассматривается возможность применения широкополосной лазерной ультразвуковой спектроскопии для определения матрицы жесткости и оценки поврежденности ортотропной геосреды. Такая среда характеризуется постоянством свойств в различных направлениях только для плоскостей, ориентированных определенным образом, которые называются плоскостями изотропии. В других направлениях данного типа среды, в частности, в направлении, перпендикулярном к плоскости изотропии, свойства имеют другие значения. Применение подобных моделей целесообразно для тонкослоистых осадочных, метаморфических пород, а также пород, испытывающих одноосное сжатие. В этом случае состояние геосреды может быть описано пятью независимыми константами [9].

2. Иммерсионный метод с использованием оптикоакустических источников для определения модулей упругости.

Для оценки модулей упругости ортотропной геосреды в широком диапазоне частот был использован следующий метод измерений. Ортотропный образец (рис. 1, Б) 1 помещался в кювету с иммерсионной жидкостью. Оптикоакустический генератор (ОАГ) 2 и широкополосный пьезопреобразователь 3 фиксировались на противоположных сторонах кюветы (рис 1, Б). Система позиционирования позволяла изменять угол падения θ ультразвуковых импульсов на образец и угол между направленной ори-

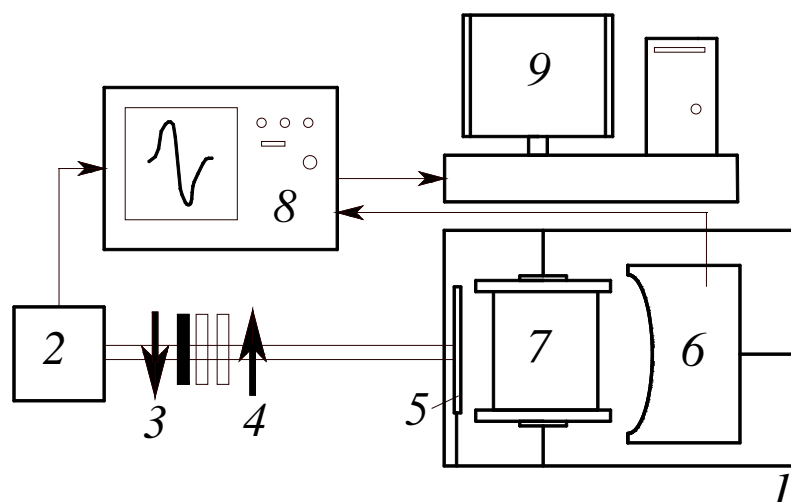
ентацией слоев x_1 и нормальную \bar{n}_1 в плоскости падения (nk) (рис.1, А).



1. образец;
2. оптико-акустический преобразователь;
3. широкополосный пьезоприемник;

Рис. 1. Геометрия плоскости падения акустической волны на образец (А) и схема распространения акустической волны (Б)

На рис. 2 приведена полная блок-схема установки «Геоскан-02М». Она включала низкочастотную 1 оптико-акустическую ячейку, импульсный Nd:YAG-лазер 2, генерирующий последовательность наносекундных импульсов с постоянной частотой следования. Данный режим обеспечивал возможность усреднения измеряемых величин по 128 импульсам, что позволило увеличить соотношение сигнал/шум, по крайней мере, на порядок по сравнению с измерениями в режиме одиночного импульса. Максимальная энергия в импульсе составляла 260 мДж, его длительность – 10 нс, частота следования могла меняться от 12 до 100 Гц. Лазерный импульс падал на рассеиватель 3, который служил для формирования равномерного по поперечному сечению распределения интенсивности. Система светофильтров 4 давала возможность уменьшать энергию лазерного импульса до 10 мДж.



1. низкочастотная оптико-акустическая ячейка;
2. лазер;
3. рассеиватель;
4. светофильтры;
5. генератор акустических сигналов на основе ПВДФ пленки в низкочастотной ячейке;
6. приемник акустических сигналов в низкочастотной ячейке;
7. зажимное устройство для образца;
8. осциллограф;
9. компьютер;

Рис. 2. Блок-схема установки «Геоскан-02М»

Сформированный оптический пучок попадал на низкочастотную оптико-акустическую ячейку 1. В нее погружался ОАГ 5, который был выполнен на основе пленки из полиэтилена высокого давления, с акустическим импедансом, близким к акустическому импедансу иммерсионной жидкости. В результате поглощения лазерных импульсов в пленке и ее последующего расширения возбуждалась последовательность однополярных упругих импульсов сжатия. Длительность переднего фронта каждого акустического импульса составляла 50 нс. Их спектр лежал в диапазоне от 0,1 до 12 МГц, а амплитуда давления достигала 10 МПа. Ширина акустического пучка не превышала 20 мм. Сигнал регистрировался задемпфированным широкополосным пьезоприемником 6 на основе ПВДФ пленки толщиной $h = 110$ мкм. Его по-

лоса пропускания по уровню половины максимума составляла $\Delta f \approx c_1 / 2h = 8$ МГц ($c_1 = 1,4 \cdot 10^3$ м/с), а диаметр приемной апертуры был равен 53 мм. Приемник был совмещен с предусилителем. Рабочая полоса частот всего приемного тракта лежала в диапазоне от 0,3 до 8 МГц. Порог детектирования широкополосного пьезоэлемента в режиме холостого хода определялся шумами и равнялся 5 Па. Динамический диапазон электроакустического тракта составлял 60 дБ.

Образец помещался в кювету в специальном зажимном устройстве 7, позволяющем вращать его вокруг вертикальной оси. Сигнал с пьезоприемника 6 подавался на осциллограф 8, а затем в усредненном виде на персональный компьютер 9. С помощью пакета программ, использующих быстрое фурье-преобразование, вычислялись амплитудный и фазовый спектры акустических сигналов, по которым рассчитывалась соответственно частотная зависимость коэффициента затухания упругих волн и дисперсия их скорости. С помощью ячейки 1 можно было исследовать образцы толщиной от 3 до 50 мм и площадью поперечного сечения от 10 до 60 см².

3. Оценка упругих констант и измерение скоростей упругих волн для ортотропной среды.

Матрица жесткости (c_{ijkl}) ортотропной среды может быть представлена (в главных осях) в виде девяти отличных от нуля компонент [9]:

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & & & & & & \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & & & & & & \\ c_{12} & c_{23} & c_{22} & & & & & & \\ & & & c_{44} & & & & & \\ & & & & 0 & & & & \\ & & & & & c_{66} & & & \\ & & & & & & c_{66} & & \\ & & & & & & & c_{66} & \end{pmatrix}, \quad (1)$$

из которых пять констант являются независимыми, а

$$c_{44} = \frac{1}{2}(c_{22} - c_{23}).$$

Для расчета данных модулей необходимо определить связь между ними и фазовыми скоростями ультразвуковых (УЗ) волн, используя уравнение Кристоффеля:

$$(\Gamma_{il} - \rho V^2 \delta_{il}) u_l = 0, \quad (2)$$

где $\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_i n_j$ - тензор Кристоффеля, δ_{il} - символ Кронекера, u_l - компонента смещения частиц в волне относительно положения равновесия.

Таким образом, для определения скорости и поляризации плоских волн, распространяющихся в анизотропной среде с матрицей жесткости c_{ijkl} , нужно найти собственные вектора и собственные значения тензора $\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_i n_j$.

В общем случае для выделенного направления существуют три скорости, являющиеся корнями характеристического уравнения:

$$|\Gamma_{il} - \rho V^2 \delta_{il}| = 0 \quad (3)$$

Так как матрица жесткости c_{ijkl} является симметричной, то тензор Γ_{il} также будет симметричным, и его собственные значения будут являться действительными величинами, а собственные вектора - ортогональными. Поэтому в анизотропной среде вдоль направления \bar{k} могут распространяться три плоские волны с различными скоростями и ортогональными поляризациями [9].

Для ортотропных сред компоненты тензора Γ_{il} будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= c_{11} n_1^2 + c_{66} (n_2^2 + n_3^2) \\ \Gamma_{12} &= (c_{12} + c_{66}) n_1 n_2 \\ \Gamma_{13} &= (c_{12} + c_{66}) n_1 n_3 \\ \Gamma_{22} &= c_{66} n_1^2 + c_{22} n_2^2 + c_{44} n_3^2 \\ \Gamma_{23} &= (c_{23} + c_{44}) n_2 n_3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Gamma_{33} = c_{66}n_1^2 + c_{44}n_2^2 + c_{33}n_3^2 .$$

Выражения (4) показывают, что варьируя направление распространения УЗ волны в ортотропной среде, можно получить искомую связь фазовых скоростей с упругими модулями.

Пусть акустическая волна распространяется вдоль оси симметрии x_1 ($\bar{k} \uparrow \uparrow x_1$), тогда:

$$\Gamma_{11} = c_{11} = \rho V_L^2, \quad \Gamma_{22} = \Gamma_{33} = c_{66} = \rho V_T^2 \quad (5)$$

Первый корень соответствует чисто продольной акустической волне; два других - чисто поперечным волнам, распространяющимся вдоль оси x_1 и поляризованным вдоль осей x_2 и x_3 , соответственно. Таким образом, можно определить упругие модули c_{11} и c_{66} . Аналогично по фазовым скоростям упругих волн, распространяющихся вдоль оси x_2 , можно найти модули c_{22} и c_{44} .

Смешанный модуль c_{12} не удастся определить, исследовав распространение акустических волн только вдоль главных осей ортотропного вещества. Для его нахождения необходимо рассмотреть распространение УЗ волн в других направлениях (проще всего в плоскости (x_1x_2)). Пусть α - угол между осью симметрии x_1 и направлением распространения волны \bar{k} (см. рис. 1 А). Тогда решая задачу на собственные значения, получим следующие корни характеристического уравнения (3):

$$\begin{cases} \rho V_{QL}^2 = \psi + \frac{1}{2}\eta, \quad \rho V_{QT}^2 = \psi - \frac{1}{2}\eta \\ \rho V_{QT}^2 = c_{66} \cos^2 \theta + c_{44} \sin^2 \theta \\ \psi = 0,5 \cdot (c_{11} \cos^2 \theta + c_{22} \sin^2 \theta + c_{66}) \\ \eta = \sqrt{((c_{11} - c_{66}) \cos^2 \theta + (c_{66} - c_{22}) \sin^2 \theta)^2 + (c_{12} + c_{66})^2 \sin^2 2\theta} \end{cases} \quad (6)$$

Следовательно, зная фазовые скорости квазипродольной (QL) и квазипоперечной (QT) волн в плоскости слоев, можно

вычислить недостающий упругий модуль c_{12} . Таким образом, будет полностью определена вся матрица жесткости $c_{\alpha\beta}$.

4. Экспериментальные результаты

В данной работе исследовалась анизотропия образцов слюдястых сланцев. Слюдистый сланец макроскопически и в шлифе представлял собой однородную породу биотит-мусковитового состава с размером чешуек слюды 0,05—0,6 мм и содержал до 15—20 % вкрапленников плагиоклаза и кварца, размеры которых достигали 2,5 мм. Структура породы равномерно мелкозернистая, текстура — сланцевая. В шлифе слюда и плагиоклаз ориентированы согласно друг с другом, слегка вытянуты, зерна кварца изометричны. По результатам изучения анизотропии с помощью метода акустополярископии образец слюдистого сланца можно отнести к ортотропным средам. В нем перпендикулярно одной оси располагаются плоскости чешуек, а перпендикулярно двум другим — их торцевые края. Поскольку удлинение чешуек слюды относительно невелико, то существенный вклад в анизотропию вносит ориентировка скоплений зерен плагиоклаза.

Для лазерно-ультразвуковой диагностики использовались образцы толщиной 7 – 8 мм и площадью поперечного сечения около 10 см². Часть образцов слюдистого сланца была вырезана параллельно плоскости преимущественной ориентации зерен плагиоклаза, остальные – в двух других взаимно перпендикулярных направлениях. Малая толщина образцов определялась сильным затуханием ультразвуковых волн и задавала нижнюю границу используемых частот (1 МГц). Более высокие, чем 3 МГц, частоты рассеивались.

Зависимость скорости распространения продольных волн от частоты в слюдистом сланце приведена на рис. 3.

Самое низкое значение скорости получено для направления, перпендикулярного расположению сланцеватости (вдоль оси x_3 , кривая 3). В двух других направлениях (кривые 1 и 2) значения скоростей различались менее чем на 7 %. Частотная зависимость коэффициента затухания продольных волн для этих направлений приведена на рис. 4.

Видно, что минимальной скорости соответствует максимальное значение коэффициента затухания (кривая 3). В диапазоне от 1,0 до 1,7 МГц он увеличивался от 3,8 до 6,2 см⁻¹. В двух других направлениях (кривые 2 и 3) при изменении частоты от 1 до 3 МГц коэффициент затухания возрастал медленнее.

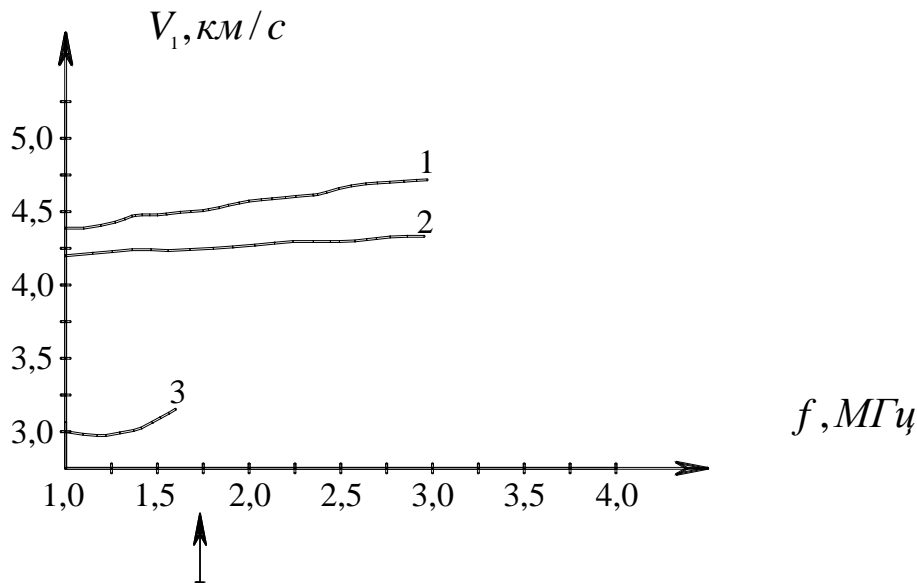


Рис. 3. Скорости распространения продольных волн в слюдяном сланце: 1 – вдоль x_1 ; 2 – x_2 ; 3 – x_3

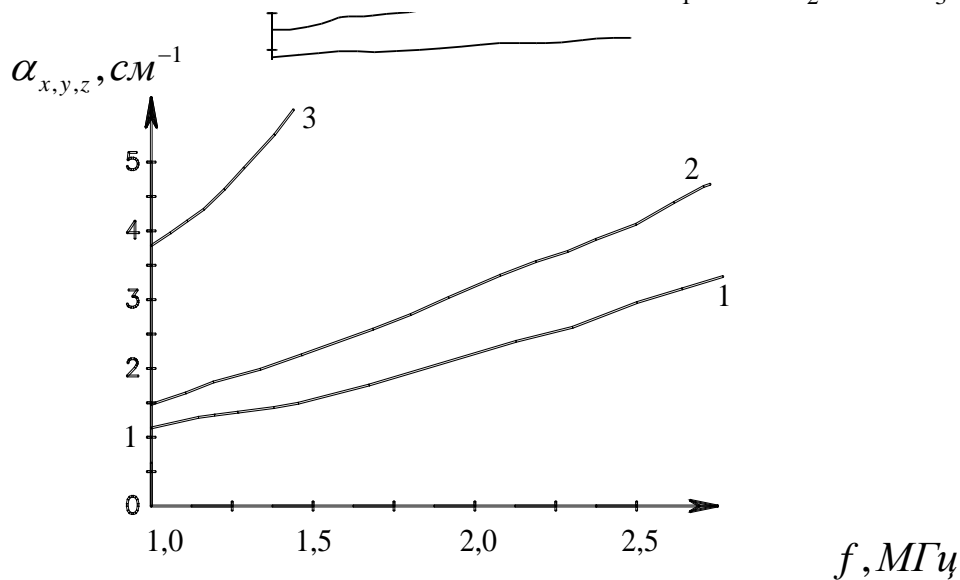


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания ультразвука, распространяющегося в направлении осей x_1 (1), x_2 (2), x_3 (3), от частоты

Для измерения частотных зависимостей скоростей поперечных волн использовался иммерсионный метод критических углов. В этом случае акустический импульс, излучаемый термооптическим источником, преломлялся на входной поверхности образца, и после преломления на выходной поверхности распространялся в направлении, параллельном первоначальному. Таким образом, при углах падения θ акустической волны из иммерсионной жидкости на образец, которые меньше критического значения для квазипродольной волны - $\theta_{cr,QL} = \arcsin(V_0/V_{QL})$ - в исследуемом образце распространялась QL волна (амплитуды Q_{T1} и Q_{T2} волн относительно малы). При углах падения $\theta_{cr,QL} < \theta < \theta_{cr,Q_{T1}}$ в композите доминировала быстрая квазипоперечная Q_{T1} волна; и при углах падения $\theta_{cr,Q_{T1}} < \theta < \theta_{cr,Q_{T2}}$ - медленная квазипоперечная волна. Регистрировались временные формы акустических импульсов: опорного, прошедшего иммерсионную среду в отсутствии образца, и исследуемого, прошедшего образец геоматериала, помещенный в иммерсионную жидкость. Сравнение фазовых спектров этих импульсов позволяло измерить разность фаз $\delta\varphi$ между гармониками частоты f опорного и исследуемого сигналов в широком диапазоне частот.

Зависимость скоростей поперечных волн от частоты, полученная с использованием метода критических углов в трех направлениях (соответственно вдоль x_1, x_2, x_3) приведена на рис. 5. Из-за сильного затухания, измерения проводились на образцах толщиной порядка 3 мм.

Данная методика измерений позволяла проводить спектроскопию продольных акустических волн во всех направлениях в исследуемых образцах. Однако в иммерсионном методе возможно возбуждение широкополосных сдвиговых акустических сигналов, поляризованных только в плоскости падения УЗ импульса на образец (S-поляризованной волны). Поэтому возбуждение, например, сдвиговой УЗ волны, распространяющейся вдоль оси x_2 и поляризованной вдоль оси x_1 , невозможно. Следовательно, получить исчерпывающие данные о распространении попереч-

ных акустических волн в композите при использовании только иммерсионной методики не удается.

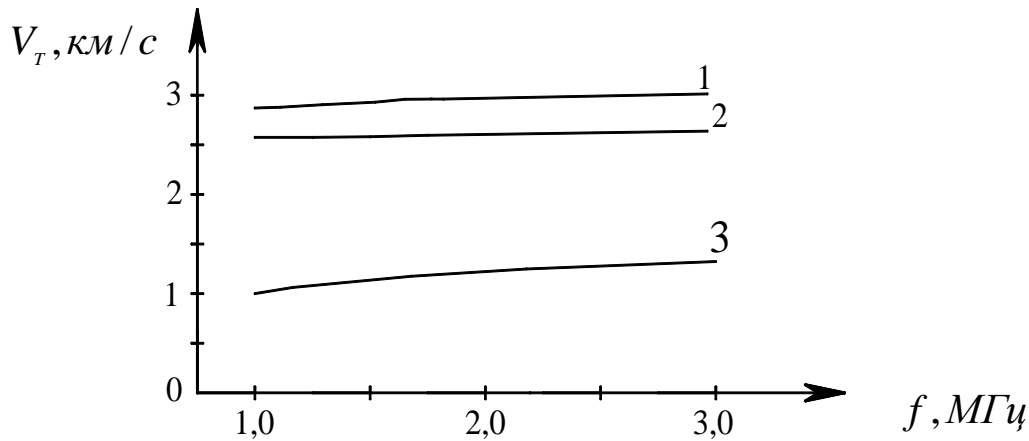


Рис. 5. Скорости распространения поперечных волн в слюдяном сланце: 1 – вдоль x_1 ; 2 – x_2 ; 3 – x_3

Для получения ясной картины распространения ультразвука в таких средах, а также для более точного вычисления упругих модулей необходимо провести исследование распространения поперечных акустических видеоимпульсов во всех направлениях внутри ортотропной среды. Поэтому (в дополнение к иммерсионной методике) использовался специально модернизированный для этой задачи генератор широкополосных сдвиговых акустических импульсов (рис. 6).

В этом случае луч лазера 1 направлялся через стекло 2 на клин туши 3, в котором возбуждался широкополосный импульс продольных акустических волн. На поверхности дюралевой призмы 4 эта волна преломлялась, причем угол преломления должен быть больше угла полного внутреннего отражения для продольной акустической волны, но меньше угла полного внутреннего отражения для поперечной акустической волны. Таким образом, продольная акустическая волна не распространялась в глубь дюралевой призмы, а распространялась вдоль ее поверхности и поверхности туши где, становясь неоднородной, затухала. Поэтому на приемник 6 из ниобата лития или на исследуемый

образец 5, который мог располагаться между призмой и приемником, попадал лишь сдвиговой УЗ сигнал. Сдвиговой сигнал обладал схожими с возбуждаемым в туши продольным акустическим сигналом амплитудночастотными характеристиками - мощностью и широкополосностью.

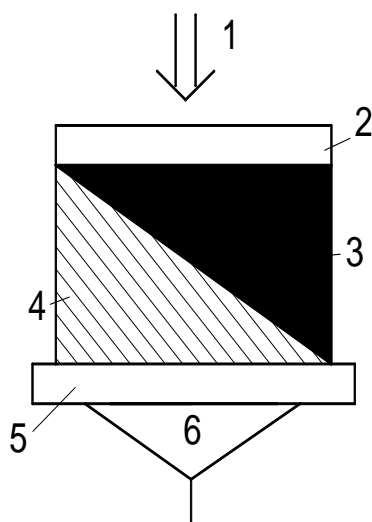


Рис. 6. Оптико-акустический генератор широкополосных сдвиговых ультразвуковых импульсов

В этом случае луч лазера 1 направлялся через стекло 2 на клин туши 3, в котором возбуждался широкополосный импульс продольных акустических волн. На поверхности дюралевой призмы 4 эта волна преломлялась, причем угол преломления должен быть больше угла полного внутреннего отражения для продольной акустической волны, но меньше угла полного внутреннего отражения для поперечной акустической волны. Таким образом, продольная акустическая волна не распространялась в глубь дюралевой призмы, а распространялась вдоль ее поверхности и поверхности туши где, становясь неоднородной, затухала. Поэтому на приемник 6 из ниобата лития или на исследуемый образец 5, который мог располагаться между призмой и приемником, попадал лишь сдвиговой УЗ сигнал. Сдвиговой сигнал обладал схожими с возбуждаемым в туши продольным акустиче-

ским сигналом амплитудночастотными характеристиками - мощностью и широкополосностью.

Использование такого генератора сдвиговых акустических импульсов позволяло исследовать распространение произвольно поляризованных поперечных акустических волн в ортотропных средах, что необходимо для получения полного набора упругих модулей.

Как было указано в начале данного раздела, иммерсионная техника с применением термооптического возбуждения УЗ позволяет определить разность фаз $\delta\varphi$ между гармониками сигнала, прошедшего образец, и иммерсионную среду (в отсутствии образца). По этим данным, а также по данным спектроскопии на сдвиговых акустических волнах можно найти фазовую скорость УЗ волн в исследуемых образцах, а по фазовым скоростям определить полный набор упругих модулей.

Для расчета фазовых скоростей всех трех акустических мод будем предполагать, что в данном частотном диапазоне геоматериал является однородной анизотропной средой. Фактически это соответствует длинноволновому приближению (длины возбуждаемых УЗ волн много больше размеров неоднородностей среды – поперечных размеров чешуек слюды и вкраплений плагиоклаза и кварца). Тогда в иммерсионной схеме после несложных вычислений получим:

$$V = \frac{V_{L0}}{\sqrt{\sin^2 \theta + (\gamma - \cos \theta)^2}} \quad (7)$$

где V_{L0} - фазовая скорость ультразвука в иммерсионной среде, $\gamma = V_{L0} \delta\varphi / L 2\pi f$, (L - толщина образца). Угол преломления акустической волны в образце может быть определен по формуле:

$$\beta = \arcsin \left(\frac{V_L \sin \theta}{V_{L0}} \right) \quad (8)$$

Этот угол, вообще говоря, может быть различен для различных спектральных компонент УЗ сигнала из-за частотной дисперсии.

В случае использования генератора сдвиговых акустических импульсов, фазовая скорость поперечных акустических волн определялся как:

$$V_T = \frac{L2\pi f}{\delta\varphi_1} \quad (9)$$

где $\delta\varphi_1$ - разность фаз между гармониками частоты f сигнала, прошедшего образец, и соответствующими гармониками УЗ сигнала в отсутствии образца.

Прежде чем непосредственно перейти к экспериментальным данным, необходимо заметить, что описанная выше методика измерений тестировалась на изотропных средах. Измерения фазовой скорости УЗ волн в оргстекле показали, что ошибка измерения фазовой скорости не превышает 0,5 % от измеряемой величины. Тем самым систематическая ошибка измерения фазовой скорости УЗ волн не должна вносить существенные коррективы в дальнейших измерениях.

На рис. 7 приведены характерные зависимости спектральной фазы гармоник исследуемых сигналов от частоты.

Видно, что зависимости являются практически линейными. Это свидетельствует об отсутствии заметной частотной дисперсии фазовой скорости УЗ волн. Вариации расчетной фазовой скорости не превышали 0,8 %, что меньше погрешности измерений (в нашем случае она определялась ошибками измерения толщины образца, угла падения и фазового сдвига и не превышала 2,5 %). Проведенные измерения на более тонких образцах показали, что заметная дисперсия фазовой скорости УЗ не наблюдается в диапазоне частот вплоть до 15 МГц. Следовательно, расчет упругих модулей по экспериментальным данным будет правомерным.

Рассчитанные модули упругости для слюдистого сланца приведены в таблице 1.

Таблица 1

Модули упругости 10^9 Па				
c_{11}	c_{22}	c_{44}	c_{66}	c_{12}
$73,2 \pm 1,2$	$84,1 \pm 1,6$	$37 \pm 0,8$	$29,7 \pm 0,8$	$19,3 \pm 1,4$

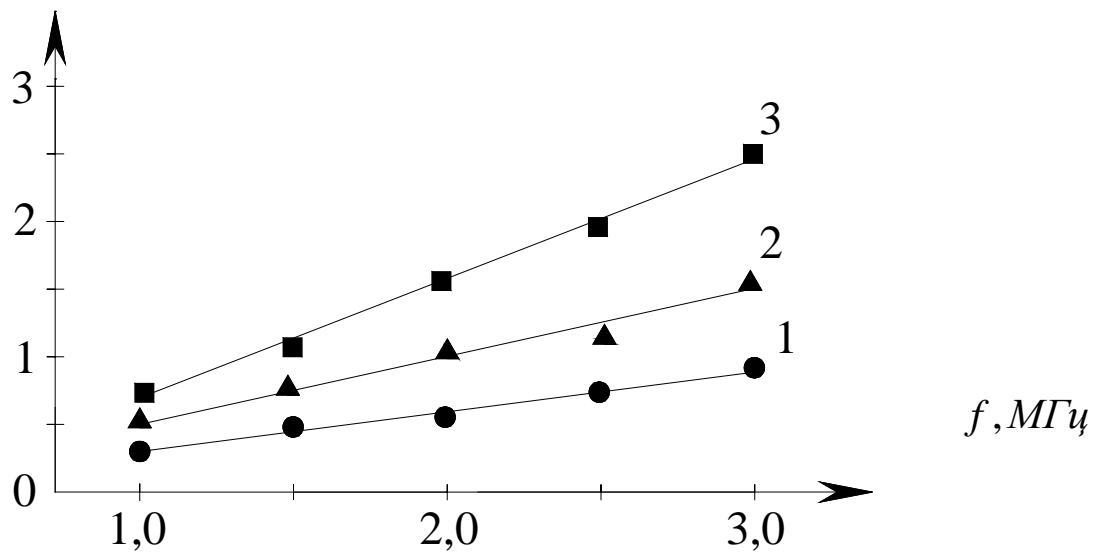


Рис. 7. Зависимость фазы ультразвукового сигнала от частоты: кривая 1 – в иммерсионной жидкости, 2 – для квазипоперечной волны в сланце при $\alpha = 90^\circ$, $\theta = 30^\circ$; 3 – для продольной волны в сланце при $\alpha = 0^\circ$, $\theta = 15^\circ$

5. Заключение

Представленные результаты показали, что использование оптико-акустических преобразователей, при помощи которых можно возбуждать упругие импульсы с длительностью 100 нс и амплитудой давления до 1 МПа, позволяет измерять скорости распространения импульсов упругих волн различных типов с точностью до 1,5 %. По данным скоростям в длинноволновом приближении появляется возможность рассчитать модули упругости ортотропных геосред с точностью 3 %. При этом частотная зависимость коэффициента затухания продольных волн несет информацию о природе анизотропии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №11-05-00574а.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Z. Hashin, "The elastic moduli of heterogeneous materials," *J. Appl. Mech.*, 29, 143 – 151 (1962).
2. W. B. Russel, "On the effective moduli of composite materials effect of fiber length and geometry at dilute concentrations," *Z. Angew. Math. Phys.*, 24, 581 – 588 (1973).
3. A. H. Nayfeh and R. L. Crane, "Reflection of acoustic waves from water/composite interfaces," *J. Appl. Phys.*, 66, No. 3, 685 – 689.
4. R. M. Christensen, *Mechanics of Composite Materials*, John Wiley & Sons, New York (1979).
5. B. Hosten and M. Deschamps, "Inhomogeneous wave generation and propagation in lossy anisotropic solids. Application to the characterisation of viscoelastic composite materials," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 82, No. 5, 1763 – 1770 (1987).
6. Hosten, "Reflection and transmission of acoustic plane waves on an immersed orthotropic and viscoelastic solid layer," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 89, No. 6, 2745-2752 (1991).
7. Y. C. Chu, A. D. Degtyar, and S. I. Rokhlin, "On determination of orthotropic material moduli from ultrasonic velocity data in non-symmetry planes," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 95, No. 6, 3191 – 3203 (1994).
8. Y. C. Chu and S. I. Rokhlin, "Comparative analysis of through-transmission ultrasonic bulk wave methods for phase velocity measurements in anisotropic materials," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 96, No. 6, 3204 – 3212 (1994).
9. A. D. Degtyar and S. I. Rokhlin, "Absolute stress determination in orthotropic materials from angular dependences of ultrasonic velocities," *J. Appl. Phys.*, 78, No. 3, 1547 – 1556 (1995).
10. Иньков В.Н., Черепецкая Е.Б., Возможности выявления микродефектов в образцах горных пород лазерным ультразвуковым методом горн. инф.-аналит. бюл. № 4, с.104 – 107 (2004).
11. Иньков В.Н., Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е. Б., Шкуратник В.Л. Ультразвуковая эхоскопия геоматериалов с использованием термооптических источников продольных волн. ФТПРТИ, № 3, с. 16 – 21 (2004).