МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТНЫХ СООТНОШЕНИЙ УПРУГИХ ВОЛН В ЗАДАЧАХ ИЗУЧЕНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ ПОРОД МЕТОДОМ АКУСТОПОЛЯРИСКОПИИ

Ковалевский М.В., Горбацевич Ф.Ф.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, koval@geoksc.apatity.ru

Аннотация

В работе приводится новая методика анализа скоростных соотношений, получаемых при помощи акустополаризационного метода. Работа направлена на увеличение точности и достоверности результатов определений физико-технических параметров твёрдых материалов, позволяет исключить влияние оператора, аппаратную и методические погрешности. Может применяться в следующих сферах промышленности: авиастроение; спортивное оборудование; машиностроение; металлургия; энергетика; разработка месторождений; сейсморазведка; строительство; бурение; космостроение; утиль радиоотходов; производство облицовочной плитки, производство ячеистых бетонов; изучение внутренней структуры кристаллов, горных пород и материалов в науках (геология, геофизика, археология, кристаллография).

В настоящее время проявляется всё возрастающий интерес исследователей к проблемам изучения сейсмической анизотропии земных недр. Анизотропия и симметрия – фундаментальные взаимосвязанные свойства геологической среды. Исследованию этой взаимосвязи при экспериментальном изучении упругих свойств горных пород уделяется пока ещё недостаточное внимание. Это объясняется, с одной стороны, методическими сложностями, связанными с необходимостью измерений свойств неоднородных и анизотропных горных пород. С другой стороны, для качественного определения таких свойств требуется специальная аппаратура, работающая в реальном режиме времени.

Наиболее перспективное направление решения этой проблемы – создание таких методик исследования упругих свойств горных пород, которые позволяли бы в процессе эксперимента полностью определять детерминированную и статистическую составляющие этих свойств. Такой подход не только обеспечивает исчерпывающее количественное описание упругих свойств горных пород и их анизотропию, но и позволит на качественно новом уровне исследовать физическую природу упругой анизотропии и явления, с ней связанные.

Ультразвуковые методы определения свойств и структуры анизотропных сред, таких как горные породы, отличает возможность получения результатов высокой точности и надёжности [1]. Особо широкие возможности для обнаружения упругой анизотропии, определения числа и пространственной направленности элементов симметрии, типа симметрии и величин констант упругости открывает акустополаризационный метод [2, 3] на

основе которого работает современный авторский комплекс Акустпол [4-6]. В соответствии с этой направленностью исследователям рекомендуется проводить измерения упругих скоростей продольных и поперечных волн. При таком подходе становится возможным наиболее точные определения физико-механических характеристик твёрдых тел. Однако определения скоростей и последующий анализ имеют погрешности измерений. Методическая погрешность связана с неоднозначностью определений исследователями. Инструментальная погрешность (см. табл.) варьируется и, в частности, зависит от времени распространения упругих волн через образец. В этой связи становится актуальной задача по разработке порядка подобных определений с учётом имеющегося опыта [7] и вышеуказанных недостатков.

Методика определения скоростей

Необходимые акустопляризационные измерения производят на образце, грани которого образованы параллельно и перпендикулярно выявленным элементам симметрии (рис.). Перед проведением измерений образец помещается между преобразователями, так чтобы его центр совпадал с центром контактных площадок. Измерения осуществляются при разной ориентации векторов преобразователей (ОВП). Наиболее подробно методика проведения измерения описывается в [3].

Рис. Индексация величин скорости распространения упругих колебаний в кубическом образце [2].

В процессе измерений определяются величины скоростей распространения продольных и сдвиговых колебаний по всем граням кубического образца. После окончания измерения всех значений скоростей удобно использовать порядок индексации измеряемых величин, приведенный ниже:

$$\begin{matrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{matrix}$$

где V_{11} , V_{22} , V_{33} – скорости распространения продольных колебаний, измеренные в направлениях 1-1', 2-2', 3-3'. V_{12} , V_{13} – скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлении 1-1', при ОВП в направлении 2-2', 3-3'; V_{21} , V_{23} – скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлении 2-2', при ОВП в направлении 1-1', 3-3'; V_{31} , V_{32} – скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлении 3-3', при ОВП в направлении 1-1', 2-2'. Измеренные величины V_{ij} представляют в виде прямоугольной таблицы (квазиматрицы).

Далее, для определения типа симметрии исследуемых образцов геоматериалов необходимо провести анализ полученных скоростных соотношений (СС).

Методика анализа скоростных соотношений

Методика анализа СС является новой и представляет собой последовательность действий, показанную здесь на примере метаморфизованного образца кварцевого плагиоклаза (ODB-319_25) керна финской скважины Оутокумпу.

Таблица. Данные измерений для метаморфизованного образца кварцевого плагиоклаза (ODB-319_25) керна финской скважины Оутокумпу.

Матрица скоростей	Величины скоростей, м/сек.	Коэффициент вариации, %	Погрешность измерений, м/сек.
$V_{11} \ V_{12} \ V_{13}$	6261 3776 3411	1.15 0.75 0.69	72 28 24
$V_{21} \ V_{22} \ V_{23}$	3595 5954 3389	0.72 1.10 0.69	26 66 23
$V_{31} \ V_{32} \ V_{33}$	3350 3287 5230	0.66 0.65 0.95	22 21 50

1. Упорядочение величин скоростей матрицы (см. табл.) по убыванию.

Из матрицы скоростей в порядке убывания выбираются величины скоростей.

$$\begin{array}{ccc}
 \textcircled{1} & \textcircled{4} & \textcircled{6} \\
 6261 & 3776 & 3411 \\
 \textcircled{5} & \textcircled{2} & \textcircled{7} \\
 3595 & 5954 & 3389 \\
 \textcircled{8} & \textcircled{9} & \textcircled{3} \\
 3350 & 3287 & 5230
 \end{array} \quad (1)$$

Из (1) в порядке убывания записываются соотношения для величин продольных волн (главная диагональ матрицы):

$$V_{11} \ V_{22} \ V_{33} \quad (2)$$

Из (1) в порядке убывания записываются соотношения для величин поперечных волн (остальные члены матрицы):

$$V_{12} \ V_{21} \ V_{13} \ V_{23} \ V_{31} \ V_{32} \quad (3)$$

2. Определение неравенств в СС.

В (2) и (3) поочерёдно слева направо выбираются две величины скорости и сравниваются между собой. Необходимо сравнить 7 соотношений (в данном случае: V_{11} с V_{22} ; V_{22} с V_{33} ; V_{12} с V_{21} ; V_{21} с V_{13} ; V_{13} с V_{23} ; V_{23} с V_{31} ; V_{31} с V_{32}). Данным скоростям соответствуют скоростные величины и погрешность измерений из табл. Большее значение скорости и её погрешность соответственно обозначим – величины V_{ij} , $V_{\Delta ij}$, меньшее – V_{kl} , $V_{\Delta kl}$. При анализе величин скоростей возможны следующие соотношения и более точное определение знаков неравенств:

а. Если $(V_{ij} - V_{\Delta ij}) > (V_{kl} + V_{\Delta kl})$, то между двумя сравниваемыми скоростями в (2) и (3) устанавливается знак «больше» ($>$). В примере:

$$V_{11} > V_{22}, V_{22} > V_{33}, V_{12} > V_{21}, V_{21} > V_{13}, V_{31} > V_{32}.$$

б. Если $(V_{ij} - V_{\Delta ij}) < (V_{kl} + V_{\Delta kl})$, то между двумя сравниваемыми скоростями в (2) и (3) устанавливается знак «приблизительное равенство» ($\sim$). В примере: $V_{23} \sim V_{31}$.

с. Если $(V_{ij} - V_{\Delta ij}) < V_{kl}$, то между двумя сравниваемыми скоростями в (2) и (3) устанавливается знак «равенство» ($=$). В примере: $V_{13} = V_{23}$.

После определения знаков неравенства соотношение (2) преобразуется в вид:

$$V_{11} > V_{22} > V_{33}, \quad (4)$$

а соотношение (3) преобразуется в вид:

$$V_{12} > V_{21} > V_{13} = V_{23} \sim V_{31} > V_{32}. \quad (5)$$

Отсюда матрице скоростей (1) соответствует следующее СС:

$$\begin{array}{c} V_{11} > V_{22} > V_{33} \\ V_{12} > V_{21} > V_{13} = V_{23} \sim V_{31} > V_{32}. \end{array}$$

3. Разбиение СС для поперечных волн (6) по парам скоростей (ПС).

Парами скоростей являются следующие скорости поперечных колебаний (3 пары):

$$V_{12}, V_{21}; V_{13}, V_{31}; V_{23}, V_{32} \quad (6)$$

В соотношении (5) необходимо выделить скорости соответствующие парам (6).

$$\begin{array}{c} V_{12} > V_{21} > V_{13} = V_{23} \sim V_{31} > V_{32}. \\ \curvearrowleft \quad \quad \quad \curvearrowright \quad \quad \quad \curvearrowright \quad \quad \quad \curvearrowright \\ \text{ПС1} \quad \quad \quad \text{ПС2} \quad \quad \quad \text{ПС3} \end{array} \quad (7)$$

В ПС1 слева направо выбирается максимальное значение скорости V_{ijmax} (V_{12}). К этому значению добавляется минимальное значение ПС – V_{ijmin} (V_{21}). Аналогичные действия необходимо совершить для ПС2 и ПС3. Определённые пары скоростей выделяются скобками.

$$(V_{12} V_{21}) (V_{13} V_{31}) (V_{23} V_{32}) \quad (8)$$

4. Определение неравенств между величинами в ПС.

Знаки неравенств между величинами в ПС выбирается следующим образом:

а. Если между V_{ijmax} и V_{ijmin} в соотношении (5) присутствует, по меньшей мере, один знак ($>$), то в ПС необходимо поставить знак ($>$). В примере: $V_{12} > V_{21}, V_{23} > V_{32}$.

б. Если между V_{ijmax} и V_{ijmin} в соотношении (5) не присутствует знак ($>$), то знак, установленный перед минимальной скоростью ПС в (5) переносится в ПС вместе с самой скоростью. В примере: $V_{13} \sim V_{31}$. Получаем соотношения между ПС:

$$(V_{12} > V_{21}) (V_{13} \sim V_{31}) (V_{23} > V_{32}) \quad (9)$$

5. Определение неравенств между ПС в СС.

Знак неравенства между ПС соответствует знаку, который установлен перед V_{ijmax} ПС в соотношении (5). Получаем следующее соотношение для величин поперечных волн:

$$(V_{12} > V_{21}) > (V_{13} \sim V_{31}) = (V_{23} > V_{32}) \quad (10)$$

6. Запись соотношений скоростей.

Из (4), (5), (10) следует окончательное определение СС в виде:

$$\begin{aligned} V_{11} &> V_{22} > V_{33} \\ V_{12} &> V_{21} > V_{13} = V_{23} \sim V_{31} > V_{32} \\ (V_{12} > V_{21}) &> (V_{13} \sim V_{31}) = (V_{23} > V_{32}) \end{aligned}$$

Изложенный выше порядок измерений позволяет определять точные соотношения для скоростей упругих колебаний с учётом погрешностей существующей при проведении акустополаризационных измерений. Методика, совместно с анализом акустополаризационных диаграмм, позволяет более точно и качественно определить тип упругой симметрии анизотропных сред, к которым относятся горные породы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00026-а.

Список литературы

1. Колесников А. М. Акустические измерения М.: Наука. 1985. 254 с.
2. Горбацевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 1995. 204 с.
3. Горбацевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2002. 140 с.
4. Ковалевский М.В. К вопросу о разработке методики определения скоростных соотношений упругих волн в задачах акустополарископии // Материалы XVIII молодеж. науч. конф. Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. СПб.: ЛЕМА. 2007. С.183-185.
5. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol. Уч. пос. Апатиты: Изд-во К&М. 2009. 54 с.
6. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol (АПАКА) для оценки качества материалов и объектов из природного камня // Контрольно-измерительные приборы и системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 4. С.10.
7. Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента. Уч. пос. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2010. 122 с.