

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Методом прохождения ультразвуковых волн определены и исследованы анизотропные свойства амфиболитов под высоким давлением. Показано, что показатель анизотропии модуля упругости в зависимости от текстуры, плоскости слоистости и сланцеватости пород имеет две оси симметрии: параллельную и перпендикулярную к плоскости напластования. Показатель анизотропии в зависимости от величины всестороннего высокого давления и угла плоскости напластования может резко измениться.

Ключевые слова: анизотропия, скалывание, слоистость, сланцеватость, трахиоидность, деформация, колебание, ультразвук, керн, радиальный, тангенциальный, сжатие, акустика.

Анизотропия является следствием упорядоченности в расположении структурных элементов и их ориентации. Анизотропными могут быть любые породы, а именно, магматические, осадочные и метаморфические. Важнейшей характеристикой анизотропии горных пород считается степень неодинаковости проявления некоторых свойств в разных направлениях. Обычно эти направления рассматриваются и оцениваются через угол встречи оси скважины с какой-то плоскостью, а именно, скалывания, слоистости, сланцеватости, трахиоидности и т.д. [1,2].

Существует большое разнообразие способов оценки степени анизотропии горных пород:

- по изменению механической скорости бурения в разных направлениях;
- по значению упругой деформации или разрушающего напряжения (твердости) породы при вдавливании штампа;
- по изменению некоторых свойств при воздействии на породу определенных физических полей – теплового, высокочастотного, силового в разных направлениях и др.;
- по скорости прохождения ультразвука и т.д.

В Государственном инженерном университете Армении разработаны методика и средства определения степени анизотропии горных пород под высоким давлением (до 100 МПа) по скорости прохождения ультразвука.

Данный метод позволяет определить параметры анизотропии у пород со скрытой, визуально невидимой внутренней слоистостью, а также у магматических пород, где индикатором анизотропии выступает направление кристаллизации, невидимое на поверхности образца (керн). Ультразвуковой прибор «Искра-226», ДВК-3 позволяет генерировать ультразвуковые колебания в диапазоне 100...2000 кГц.

Для получения достоверных результатов по измерению скоростей ультразвука необходимо соблюдать определенное соотношение между размерами образцов керна, частотой колебаний f , длиной волны λ и скоростью v . В камере высокого давления испытывались кубики амфиболитов и диабазов под разными углами к линиям текстуры, размеры которых изменяются в пределах от 18 до 21 мм. Если учесть, что скорость продольных ультразвуковых волн в зависимости от плотности пород меняется в диапазоне 2500...8500 м/с, то, исходя из соотношения $v = \lambda f$ для существующих диаметров керна, частота колебаний в пределах 100...1000 кГц вполне удовлетворяет.

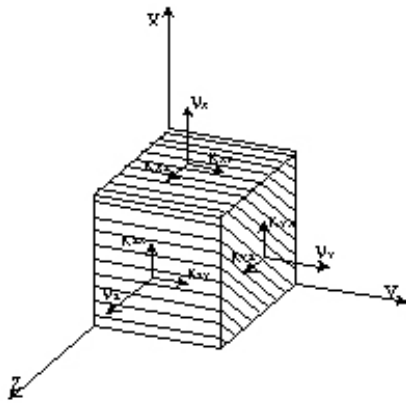


Рис.1. Схематическое обозначение направления ультразвуковых волн (V_x , V_y , V_z) и показателей анизотропии (K_{xy} , K_{xz} , K_{yz} , K_{yx} , K_{zx} , K_{zy})

Измерение проводилось в трехосных взаимно перпендикулярных направлениях образцов, которые находились в сжатом состоянии со всех сторон (рис.1). Давление в камере можно регулировать в пределах от 0 до 10 килобар. Датчики излучателя и приемника ультразвуковой установки закрепляются на образцах соосно на параллельных зашлифованных поверхностях, а выходы выносятся наружу и присоединяются к осциллографу.

Для достоверности данных с каждой породы подготавливаются по шесть и более образцов с разными углами слоистости.

На основании полученных значений скоростей количественно оценена степень анизотропии слоистых (сланцеватых) и

кристаллических текстур:

$$k_{xy} = \frac{v_x}{v_y}, k_{xz} = \frac{v_x}{v_z}, k_{yz} = \frac{v_y}{v_z}, \quad (1)$$

где k_{xy} , k_{xz} , k_{yz} – показатели анизотропии по разным плоскостям; v_x , v_y , v_z – скорости распространения ультразвуковых волн.

Если показатель анизотропии отличается от единицы, то порода анизотропна.

По данным [3], существует функциональная связь между углами падения, слоистости φ и скоростями v прохождения ультразвука во взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$\varphi = \frac{90^\circ}{1 + \frac{v_x - v_z}{v_x - v_y}}. \quad (2)$$

Известно, что модуль упругости E среды связывается со скоростью v распространения звука следующей зависимостью:

$$E = v^2 \rho, \quad (3)$$

где ρ - плотность среды.

На основании (3) запишем выражение для расчета показателя анизотропии по модулю упругости по двум взаимно перпендикулярным направлениям – параллельному $v_{\parallel}$ и перпендикулярному $v_{\perp}$ к плоскостям сланцеватости, принимая длину волны одинаковой в обоих направлениях:

$$\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = \frac{v_{\parallel}^2 P_{\parallel}}{v_{\perp}^2 P_{\perp}}. \quad (4)$$

В таблице приведены результаты экспериментального определения показателей анизотропии амфиболитов по акустическим свойствам (K_{xy} , K_{xz} , K_{yz}) и расчетного показателя анизотропии по упругости (E_{xy} , E_{xz} , E_{yz}) под разными углами сланцеватости и давления.

Измерения скорости ультразвука производились с помощью датчиков (тензорезисторов), наклеенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях на боковые поверхности образцов с шестью ориентациями. По полученным данным скорость распространения ультразвуковых волн в направлении вдоль слоистости ($\varphi=0^\circ$) имеет наибольшее значение ($V=6090 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$), соответственно величина модуля упругости имеет наибольшее значение ($E = 3,24$). С увеличением угла наклона оси сравнения по отношению к радиальному и тангенциальному направлениям величина модуля упругости резко уменьшается. Это объясняется тем, что деформативность в диагональном направлении, перпендикулярном слоистости, выше, чем в радиальном и тангенциальном. Второе обстоятельство, которое представляет интерес в этих опытах, свидетельствует о том, что при сжатии под углом 45° в направлении к ориентированным структурным элементам в тангенциальной плоскости уменьшается не только продольный, но и поперечный размеры образца.

На рис. 2а представлена в полярных координатах кривая изменения показателя анизотропии амфиболита по модулю упругости (E_{yz}) при нулевом давлении, а на рис. 2б – при давлении 40 МПа . На рисунках ясно видно, что для этого образца породы характерны две оси симметрии кривой, отражающей изменение показателя анизотропии по модулю упругости. Аналогичную, но несколько видоизмененную форму имеют кривые показателя анизотропии по радиальным (E_{xy}) и тангенциальным (E_{xz}) направлениям.

На рис. 3 и 4 изображены зависимости показателя анизотропии (E_{yz} и E_{xy}) от давления (P) и угла плоскости напластования. Анализ этих зависимостей показывает, что под всесторонним давлением до 40 МПа резко уменьшаются величины модуля упругости и, соответственно, показатели анизотропии в зависимости от направления напластования в 1,5...2 раза, а под давлением от 40 до 100 МПа существенного изменения не происходит.

Таблица

Результаты экспериментального определения показателей анизотропии амфиболитов по акустическим свойствам (K_{xy} , K_{xz} , K_{yz}) и расчетного показателя анизотропии по упругости (E_{xy} , E_{xz} , E_{yz}) под разными углами сланцеватости и давления

P, МПа	0	20	40	60	80	100
φ , град	0					
K_{xy}	1,37	1,23	1,16	1,13	1,12	1,09
K_{xz}	1,80	1,40	1,29	1,24	1,21	1,19
K_{yz}	1,32	1,13	1,11	1,09	1,08	1,08
E_{xy}	1,88	1,52	1,35	1,29	1,25	1,19
E_{xz}	3,24	1,96	1,66	1,54	1,46	1,41
E_{yz}	1,74	1,29	1,23	1,19	1,16	1,16
φ , град	30					
K_{xy}	1,20	1,13	1,10	1,06	1,05	1,05
K_{xz}	1,43	1,27	1,20	1,17	1,14	1,15
K_{yz}	1,19	1,13	1,11	1,11	1,08	1,10
E_{xy}	1,45	1,28	1,16	1,12	1,10	1,10
E_{xz}	2,04	1,61	1,44	1,37	1,30	1,33
E_{yz}	1,41	1,27	1,24	1,22	1,18	1,21
φ , град	60					
K_{xy}	0,91	1,02	1,04	1,03	1,00	0,99
K_{xz}	0,69	0,86	0,91	0,85	0,88	0,88
K_{yz}	0,75	0,84	0,87	0,82	0,88	0,88
E_{xy}	0,83	1,04	1,08	1,06	1,00	0,98
E_{xz}	0,48	0,74	0,83	0,80	0,77	0,77
E_{yz}	0,57	0,71	0,76	0,76	0,77	0,77
φ , град	90					
K_{xy}	0,58	0,69	0,81	0,83	0,82	0,81
K_{xz}	0,86	0,84	0,92	0,94	0,94	0,93
K_{yz}	1,50	1,20	1,14	1,13	1,14	1,14
E_{xy}	0,33	0,48	0,66	0,69	0,67	0,66
E_{xz}	0,74	0,70	0,85	0,88	0,87	0,87
E_{yz}	2,23	1,44	1,29	1,28	1,30	1,30

Известно, что в условиях равномерного всестороннего сжатия, в зависимости от текстуры пород, происходит либо упругая, либо остаточная деформация. Обычно в породах с явно выраженной слоистостью или сланцеватостью модуль упругости в направлении слоистости больше, чем в направлении, перпендикулярном слоистости, иногда наблюдается и обратное явление. Как видно из табл., обратное явление происходит и для амфиболитов при углах больше 45° .

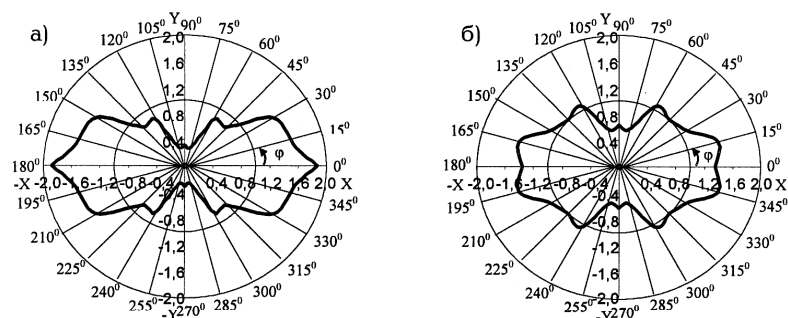


Рис.2. Полярные диаграммы показателя анизотропии амфиболитов по модулю упругости E под высоким давлением P при: а - $P=0$ МПа; б - $P=40$ МПа

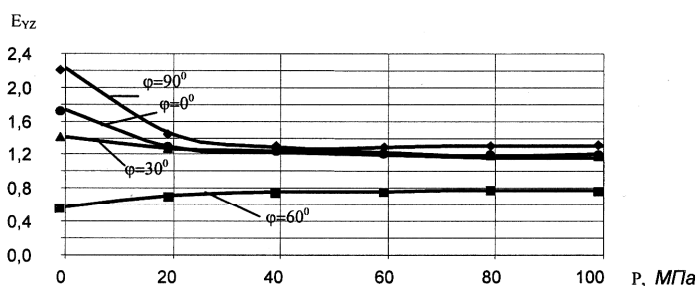


Рис.3. Зависимости показателя анизотропии (E_{yz}) от давления (P) и угла плоскости напластования (φ)

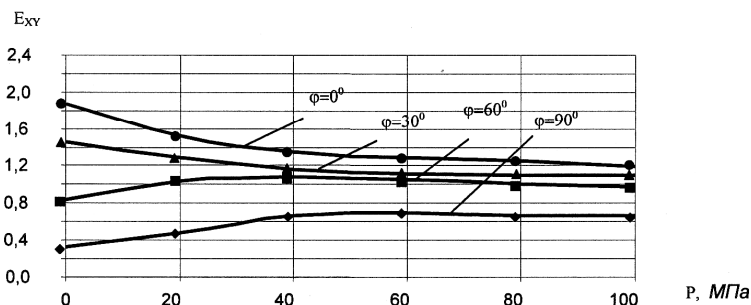


Рис.4. Зависимости показателя анизотропии (E_{xy}) от давления (P) и угла плоскости напластования (φ)

Так как процесс искривления скважин формируется на забое скважины при сильном взаимодействии породоразрушающего инструмента и горной породы при условии, если она анизотропна, то интенсивность искривления может возрастать многократно, т.е. диктует свои условия. В связи с этим представляется более продуктивным изучение процессов, происходящих при искривлении скважин в анизотропных породах, с целью использования этих

значений при проектировании траекторий скважин и создании технологий управления искривлениями.

Обработка и анализ экспериментальных данных приводят к следующим выводам:

1. Показатель анизотропии по модулю упругости имеет две оси симметрии – параллельную и перпендикулярную к плоскостям напластования.
2. В зависимости от величины всестороннего равномерного сжатия и текстуры пород резко изменяются модуль упругости, коэффициент Пуассона, прочность на сжатие и другие свойства, что приводит к увеличению или уменьшению показателя анизотропии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулакшин С.С. Направленное бурение. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
2. Калинин А.Г., Левицкий А.З. Технология бурения разведочных скважин на жидкие и газообразные полезные ископаемые. – М.: Недра, 1988. – 370 с.
3. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: НТЛ, 1999. – 240 с.

ГИУА . Материал поступил в редакцию 15.06.2004.

Ռ.Զ.ՀԱԿՈԲՅԱՆ ԱՊԱՐԱՆԵՐԻ ԱՆԻԶՈՏՐՈՊՈՒԹՅԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՏԱՎ

Բարձր ճնշման տակ հետազոտման են ենթարկվել անիզոտրոպ հատկություններով օժտված թերթային կառուցվածք ունեցող ամֆիբոլիտային ապարների նմուշներ՝ դրանց միջով տարբեր անկյունների տակ անցկացնելով ուլտրաձայնային ալիքներ: Արդյունքները ցույց են տվել, որ առաձգականության մոդուլի անիզոտրոպության ցուցանիշն ունի սիմետրիայի երկու առանցքներ՝ ա) թերթայնության հարթությանը զուգահեռ և բ) ուղղահայաց ուղղություններով և, կախված ապարների կառուցվածքից և համակոորդատների հավասարաչափ ճնշման մեծությունից, կարող է կտրուկ փոփոխվել:

Առանցքային բառեր. անիզոտրոպություն, սահքապոկում, թերթայնություն, շերտայնություն, տրախիտիդայնություն, դեֆորմացիա, տատանում, ուլտրաձայն, հորատահանում, շառավղային, տանգենցիալ, սեղմում, ակուստիկա:

R.Z. HAKOBYAN DETERMINATION OF ROCK ANISOTROPY UNDER HIGH PRESSURE

Anisotropy properties of amphibolites under high pressure are determined and investigated by the ultrasound method. It is known that elasticity module anisotropy index depends on texture; lamination plane shaling of rocks has two symmetry axes – parallel with and perpendicular to the lamination plane. Depending on the value of high pressure and lamination plane angle, the anisotropy index may change according to the rock texture and high pressure value.

Keywords: anisotropy, spalling, stratification, shaling, strain, oscillation, ultrasound, sample, radial, tangent, compression, acoustics.