

К ИССЛЕДОВАНИЮ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ОСНОВЕ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДЕФОРМАЦИЙ

Х.Б.Агаев

*Институт геологии НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

В рамках неклассической теории деформаций выведены формулы для расчленения значений изменений скоростей сейсмических волн на три составляющие в зависимости от давления. Из них первая составляющая постоянна, равна значению скорости при атмосферном давлении, а вторая и третья составляющие при изменении давления меняются соответственно линейно и нелинейно. Применение соотношения значений нелинейной составляющей к постоянной позволяет приводить зависимость скоростей от давления для различных пород к единому уровню. Приводятся некоторые примеры по расчленению значений скоростей распространения продольных и поперечных волн в образцах горных пород при различных давлениях, измеренных в лабораторных условиях. Для плагиогранита по продольным волнам при давлении 1.5 ГПа значения линейной и нелинейной составляющих соответственно равны 2.3% и 34.5% от полного значения скоростей. По поперечным волнам это соответственно составляет 1.3% и 18.2%. Применение расчленения скоростей на составляющие позволяет более наглядно показать различия в изменении скоростей от давления, а соотношение составляющих позволяет количественно сопоставить изменения пористости и трещиноватости различных пород при изменении давления.

Исследование скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн в горных породах при высоких давлениях представляет большую научную и практическую ценность при изучении физических свойств пород как в лабораторных условиях, так и в реальных условиях при геофизических работах.

Известно, что горные породы состоят из породообразующих минералов и, как правило, содержат сухие или насыщенные газом либо флюидом поры и микротрещины. В отличие от минералов, которые являются регулярными средами, горные породы, как правило, имеют несовершенные текстуры и их упорядоченность носит схоластический характер (Александров и Продайвода, 2000). Горные породы, залегающие в условиях больших глубин и давлений, имеют сплошные и прочные контакты между зернами. При извлечении зерна из скважины происходит расширение каждого минерального зерна породы в соответствии с его константами упругости. Деформации, возникающие в каждом анизотропном минеральном зерне, приводят к разрыву первоначально прочных межзерновых контактов, появлению очень тонких микротрещин. В лабораторных условиях в процессе замеров продольные и поперечные волны огибают эти

трещины. При этом путь прохождения волн существенно удлиняется, и соответственно определяемые величины скорости продольной (V_P) и поперечной (V_S) волн уменьшаются (Горбацевич и др., 2007). В лабораторных исследованиях при наращивании давления в горной породе происходит закрытие дефектов строения микротрещин, увеличение числа акустических контактов между зернами минералов. В итоге это приводит к увеличению упругих модулей и к возрастанию скоростей (Протождяконов и др., 1981). На начальном этапе увеличения давления порода, как бы «сопротивляясь» нарастающему внешнему давлению, проявляет «свой характер», примерно обратный тому, что происходило при извлечении зерна из скважины. Эти процессы наиболее интенсивно происходят при увеличении давления от 0,0001 ГПа примерно до 0,2 ГПа, когда имеется высокий градиент изменения скоростей, а в дальнейшем протекают очень медленно.

Результаты лабораторных измерений в образцах пород скоростей волн при различных давлениях (P) визуально представляются в графической форме в виде зависимостей $V_P = f(P)$ и $V_S = f_1(P)$ (Воларович, 1978). Это форма представления позволяет исследо-

вать влияние различных факторов на изменение значений скоростей, упругих параметров образцов пород при изменении давления, а также сопоставлять эти зависимости по различным породам. Однако у этой формы представления имеются также следующие недостатки:

- затруднение сопоставления графиков по породам, обусловленное их различными уровнями значений скоростей;
- отсутствие сравнительной оценки изменения пористости и трещиноватости пород при изменении давления.

В данной статье приводятся некоторые примеры по обработке результатов лабораторных измерений скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн для различных горных пород в виде расчленения значений скоростей на составляющие. Правомерность расчленения значений скоростей обосновывается на основании неклассической теории деформаций.

Известно, что в различных областях науки и техники для изучения физических процессов к результатам измерений широко применяют спектральный и корреляционный анализы, интегрирование и дифференцирование, разложение на ряды и другие приемы обработки данных. Например, при спектральном анализе процессы изучают по различным гармоническим составляющим результатов измерений. Учитывая негармонический характер кривых $V_p = f(P)$ или $V_s = f_1(P)$, применение спектрального анализа к этим данным не представляется эффективным. А дифференцирование этих кривых позволяет определить только градиент изменения скоростей от давления, и оно очень чувствительно к ошибкам измерений.

Для устранения вышеуказанных недостатков существующей формы представления изменения скоростей от давления нами предлагается расчленение значений скоростей на их составляющие, физический смысл, которого состоит в том, что измеренная скорость распространения волны по образцу породы в лаборатории состоит из составляющих: скорости при атмосферном давлении и приращения скорости, обусловленной увеличением давления. Порода представляется такой, как если бы она состояла из монолитной части,

упругая характеристика которой не меняется при изменении давления, и части, у которой упругая характеристика меняется при изменении давления из-за наличия пор и трещин. Правомерность такого расчленения по скоростям рассмотрим согласно неклассической теории деформаций.

Теоретические исследования (Гузь, 1986; Кулиев, 2005; Кулиев и Ширинов, 2005) по неклассической теории деформаций показали на возможность аналитического описания зависимости изменения скоростей продольных и поперечных волн от значений давлений. Основываясь на этом, выведем формулы для расчленения значений скоростей распространения продольных и поперечных волн по составляющим.

Известно, что упругие параметры, постоянные Ламе (μ_0 и λ_0) и модуль упругости (k_0) при условии атмосферного давления вычисляются по следующим классическим формулам:

$$\mu_0 = \rho_0 V_{S0}^2; k_0 = \lambda_0 + \frac{2}{3} \mu_0; \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \rho_0 V_{P0}^2 - 2 \rho_0 V_{S0}^2.$$

где V_{P0} , V_{S0} – соответственно скорости продольных и поперечных волн в ненапряженных условиях, т.е. при атмосферном давлении, ρ_0 – плотность пород при атмосферном давлении.

Для экстраполяции значений V_{P0} и V_{S0} , определенных в лабораторных условиях при атмосферном давлении, на условия более высоких давлений выведены (Кулиев, 2005) следующие формулы:

$$V_p(P) = \sqrt{\frac{\lambda_0 + 2\mu_0 + A(P)}{\rho_0}}; \quad (2)$$

$$V_s(P) = \sqrt{\frac{\mu_0 + B(P)}{\rho_0}}.$$

Для случая «истинных» значений скоростей по теории малых начальных деформаций значения $A(P)$ и $B(P)$ вычисляются по формулам:

$$A(P) = -\frac{P}{6k_0} [5\lambda_0 + 6\mu_0 + 2K(P)]; \quad (3)$$

$$B(P) = -\frac{P}{3k_0} [3\lambda_0 + 6\mu_0 + 2X(P)],$$

где $K(P)$ и $X(P)$ – комбинированные модули упругости 3-го порядка, нелинейно меняющиеся при изменении давления.

«Истинные» скорости – это скорости, при измерении которых изменения расстояний между фиксированными точками образца за счет предварительного (до возникновения волнового поля) деформирования учитываются (Гузь, 1986).

После несложных преобразований с использованием формул (1)-(3) по скоростям продольных и поперечных волн получим следующие формулы:

$$V_P^2(P) = a_1 + a_2 P + a_3 P K(P); \quad (4)$$

$$V_S^2(P) = b_1 + b_2 P + b_3 P X(P).$$

Здесь:

$$a_1 = \frac{\lambda_0 + 2\mu_0}{\rho_0}; \quad a_2 = -\frac{5\lambda_0 + 6\mu_0}{6\rho_0 k_0}; \quad (5)$$

$$a_3 = -\frac{1}{6\rho_0 k_0};$$

$$b_1 = \frac{\mu_0}{\rho_0}; \quad b_2 = -\frac{3\lambda_0 + 4\mu_0}{3\rho_0 k_0}; \quad (6)$$

$$b_3 = -\frac{1}{3\rho_0 k_0}.$$

Как видно из формул (4), квадрат полного значения скоростей $V_P^2(P)$ и $V_S^2(P)$ можно представить в виде суммы трех составляющих скоростей:

- первая составляющая постоянна, равна квадрату значения скорости при атмосферном давлении:

$$V_{P1}^2(0) = a_1 = V_{P0}^2; \quad V_{S1}^2(0) = b_1 = V_{S0}^2; \quad (7)$$

- вторая составляющая при изменении давления изменяется линейно:

$$V_{P2}^2(P) = a_2 P; \quad V_{S2}^2(P) = b_2 P; \quad (8)$$

- третья составляющая при изменении давления меняется нелинейно, что обусловлено нелинейным характером изменений $K(P)$ и $X(P)$:

$$V_{P3}^2(P) = a_3 P X(P); \quad V_{S3}^2(P) = a_3 P X(P). \quad (9)$$

Коэффициенты $a_i (i=1,2,3)$ и $b_i (i=1,2,3)$ связаны с линейными модулями упругости.

Для оценки величин составляющих скоростей были использованы экспериментальные данные (Сафаров и др., 1981) по результатам лабораторных измерений скоростей для некоторых горных пород. Данные приводятся ниже в таблице.

Известно, что габброиды и плагиограниты изотропны, а пироксениты – анизотропны и имеют сильно различающиеся минеральный состав и структуру. По этим данным были построены в принятой форме графики полных значений скоростей $V_P(P)$ (рис. 1а) и $V_S(P)$ (рис. 1б). Сопоставление графиков для различных пород показывает широкий диапазон изменений значений скоростей. А формы самих графиков отличаются в основном следующим:

- значением скоростей при атмосферном давлении (0.0001 ГПа);
- сильным градиентом увеличения скоростей в диапазоне давлений 0.0001-0.2 ГПа;
- формой и значениями градиента скоростей в диапазоне давлений 0.0001-0.2 ГПа;
- слабым градиентом скоростей при давлениях, превышающих примерно 0,2 ГПа;
- формой и значениями градиента при давлениях, превышающих примерно 0,2 ГПа.

Учитывая характер изменения скоростей в интервале давлений от 0,0001 ГПа примерно до 0,2 ГПа, можно предположить, что в этом интервале сосредоточена основная информация о пористости, трещиноватости и других свойствах пород.

Физические характеристики пород

Порода	Параметр	Давление, в ГПа									
		0.0001	0.07	0.12	0.25	0.43	0.60	0.81	1.04	1.28	1.50
Плаггиогранит 25-2	V_p , км/сек	2.64	2.65	2.66	2.67	2.69	2.71	2.72	2.73	2.74	2.75
	V_s , км/сек	4.06	5.60	5.56	5.53	5.57	5.71	5.89	6.02	6.14	6.20
	ρ , г/см ³	2.92	3.35	3.34	3.37	3.41	3.46	3.49	3.51	3.53	3.57
Габбро 80-2	V_p , км/сек	2.89	2.90	2.91	2.92	2.94	2.96	2.96	2.97	2.98	2.98
	V_s , км/сек	6.25	7.21	7.30	7.05	6.98	7.06	7.10	7.17	7.20	7.34
	ρ , г/см ³	3.89	4.09	4.18	4.15	4.07	4.14	4.16	4.19	4.24	4.28
Габбро-норит 39-2	V_p , км/сек	3.06	3.10	3.13	3.14	3.16	3.17	3.18	3.20	3.20	3.21
	V_s , км/сек	6.72	7.20	7.18	7.18	7.25	7.35	7.37	7.46	7.54	7.86
	ρ , г/см ³	3.80	3.83	3.88	3.86	3.89	3.92	3.95	3.98	4.01	4.17
Пироксенит 41-2	V_p , км/сек	3.19	3.20	3.21	3.22	3.24	3.24	3.25	3.26	3.26	3.27
	V_s , км/сек	7.13	8.15	7.99	7.89	7.95	8.15	8.30	8.38	8.51	8.61
	ρ , г/см ³	4.06	4.53	4.44	4.35	4.32	4.39	4.41	4.45	4.51	4.57
Пироксенит 78-1	V_p , км/сек	3.26	3.24	3.25	3.25	3.27	3.28	3.29	3.29	3.30	3.31
	V_s , км/сек	7.53	8.49	8.39	8.26	8.27	8.37	8.46	8.54	8.67	8.87
	ρ , г/см ³	4.44	4.66	4.60	4.57	4.53	4.56	4.58	4.61	4.67	4.73

Затем полные значения скоростей были расчленены с использованием формул (7)-(9) на три составляющие. Первая из них $V_{P1}(0)$ и $V_{S1}(0)$ имеет основную долю полного значения скорости (рис. 1а, б). Расчеты показывают, что значения второй составляющей $V_{P2}^2(0)$ и $V_{S2}^2(0)$ очень незначительны. Например, среди изучаемых пород плаггиогранит 25-2 при давлении 1.5 ГПа имеет наибольшее значение второй составляющей, равное 2.3% по продольным и 1.3% по поперечным волнам от квадрата полного значения скоростей. Можно принять, что эти величины находятся в пределах ошибок лабораторных измерений. По той же породе при давлении 1.5 ГПа значение третьих составляющих $V_{P3}^2(P)$ и $V_{S3}^2(P)$ равно 34.5% по продольным и 18.2% по поперечным волнам от полного значения скоростей. При принятии условий, что для практических целей $V_{P2}(P) \approx 0$ и $V_{S2}(P) \approx 0$ третья составляющая будет равна разности полного и первого составляющих значений скоростей:

$$V_{P3}(P) \approx V_P(P) - V_P(0); \quad (10)$$

$$V_{S3}(P) \approx V_S(P) - V_S(0).$$

Таким образом, по данным породам зависимости $V_P(P)$ и $V_S(P)$ при каждом давлении можно разложить на составляющие, первая из которых равна значению скорости при атмосферном давлении, вторая считается равной нулю, а третья равна разности полного значения и первой составляющей скорости. Третью составляющую можно представить как перемещение графиков $V_P(P)$ и $V_S(P)$ по оси скоростей на величины соответственно $-V_P(0)$ и $-V_S(0)$, что и видно по продольным волнам на рис. 1а и рис. 1в, а по поперечным – на рис. 1б и рис. 1г. Наряду с этим следует отметить, что по некоторым типам пород возможно более высокое значение линейной составляющей, как описано выше.

Теперь определим некоторые особенности составляющих скоростей. Постоянные составляющие скоростей по анизотропным породам больше, чем по изотропным (рис. 1а, 1б) по обоим типам волн. Третья составляющая $V_{P3}(P)$ и $V_{S3}(P)$ при изменении давления увеличивается в нелинейной форме и существенно различается по породам (рис. 1в, 1г). По породам габбро 80-2, пироксенит 78-1 и пироксенит 41-2 более наглядно отмечается полиморфизм скоростей. Примерно подобное наблюдается и по поперечным волнам (рис. 1г).

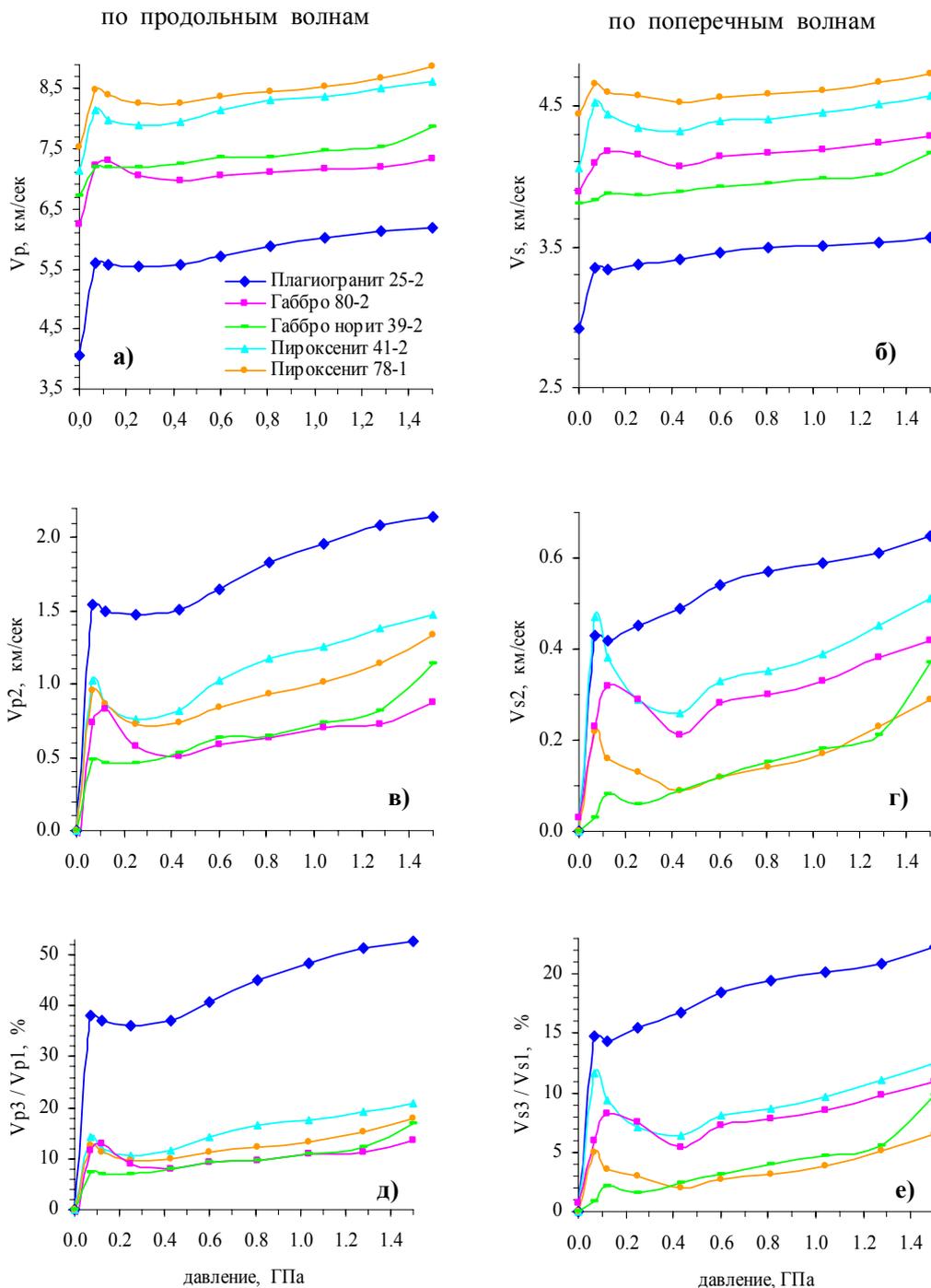


Рис. 1. Графики изменения значений полного (а, б), нелинейной составляющей (в, г) и соотношения нелинейной к полной (д, е) составляющей значений скоростей в зависимости от давления.

При давлениях примерно $P > 0.2$ ГПа изменение скоростей носит в основном линейный характер. Известно, что чем больше исходная пористость, тем заметнее возрастание скорости с увеличением давления. Например, при изменении давления от 0.0 ГПа до

1.5 ГПа по плаггиограниту 25-2 приращение скорости составляет 2140 м/сек по продольным и 650 м/сек по поперечным волнам, что говорит о его высокой первоначальной пористости. В отличие от принятой формы представления (рис. 1а, б), на графиках (рис. 1в, г)

более наглядно видно и удобно проводить сопоставление градиентов изменения скоростей от давления по различным породам.

Рассмотрим соотношение нелинейной составляющей скорости к постоянной по породам (рис 1д, 1е). Это соотношение можно представить как нормировка третьей составляющей к постоянной составляющей. Такая нормировка приводит зависимость скоростей от давления по всем породам к единому уровню и позволяет численно определять отличие пород, обусловленное наличием в них пор и трещин. По поперечным волнам значение соотношения скоростей примерно в два раза меньше, чем по продольным волнам, а по форме графики отличаются. Это объясняется тем, что трещиноватость, направление трещиноватости, флюидонасыщенность и другие свойства пород по-разному влияют на скорость распространения продольных и поперечных волн. Совместное использование данных по продольным и по поперечным волнам дает более достоверные результаты для изучения физических свойств пород.

По нашему мнению, составляющие скоростей и их соотношения, определяемые вышеуказанным образом, несут в себе в основном следующую информацию о физических свойствах пород:

- постоянная составляющая – в основном об особенностях минерального состава пород, об их пористости и трещиноватости до изменения давления;
- нелинейная составляющая – в основном об изменяющейся пористости и трещиноватости пород при изменении давления;
- соотношение нелинейной составляющей к постоянной составляющей позволяет количественно сопоставлять по различным породам изменения пористости и трещиноватости, происходящие в породе при наращивании давления.

Таким образом, предложена обработка

результатов лабораторных измерений скоростей путем расчленения значений скоростей на составляющие. Правомерность расчленения следует из неклассической теории деформаций. Применение расчленения скоростей на составляющие в зависимости от давления по некоторым горным породам позволило бы более наглядно показать отличие графиков изменения скоростей от давления, которое явно не наблюдается при рассмотрении только полной составляющей. Разложение по составляющим позволяет количественно сопоставлять изменения пористости и трещиноватости различных пород при изменении давления.

Работа выполнена в рамках гранта № 3647 Украинского Научного и Технологического Центра.

ЛИТЕРАТУРА

- АЛЕКСАНДРОВ, К.С., ПРОДАЙВОДА, Т.Г. 2000. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Издательство СО РАН. Новосибирск. 354.
- ВОЛАРОВИЧ, М.П. 1978. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. Недра. Москва. 237.
- ГУЗЬ, А.Н. 1986. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Общие вопросы, I. Закономерности распространения, II. Наук. Думка. Киев. 376, 536.
- ГОРБАЦЕВИЧ, Ф.Ф., ГОЛОВАТАЯ, О.С., СМІРНОВ, Ю.П. 2007. Кольская сверхглубокая скважина (СГ 3): новое в свойствах глубинных пород. *Геофизический журнал*, 3, 29.
- КУЛИЕВ, Г.Г. 2005. Неклассическая линеаризованная теория деформаций в геофизике. *Известия НАН Азербайджана. Науки о Земле*, 2, 41 – 51.
- КУЛИЕВ, Г.Г., ШИРИНОВ, Н.М. 2005. К определению второго порядка модулей упругости напряженных нелинейных изотропных сред. *Известия НАН Азербайджана. Науки о Земле*, 3, 10 – 16.
- ПРОТОДЬЯКОНОВ, М.М., ТЕДЕР, Р.И., ИЛЬНИЦКАЯ, Е.И. и др. 1981. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие. Недра. Москва. 192.
- САФАРОВ, И.Б. и др. 1981. Анизотропия скорости поперечных волн в оливинсодержащих породах при давлениях до 15 кбар. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 9, 38-43.

Рецензент: чл.-корр. НАН Азербайджана Г.Г.Кулиев