

УДК 622.02: 539.2

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ
РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

П. В. Николенко, В. Л. Шкуратник, М. Д. Чепур

*Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
E-mail: ftkp@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

Исследованы два типа известняка различной пористости, подвергнутые термической и механической нагрузке. Установлено, что увеличение осевой нагрузки приводит к росту скоростей упругих волн, повышение температуры — к их уменьшению. Высокие температуры способствуют увеличению приращения скоростей продольных и поперечных волн с ростом механической нагрузки, что повышает акустическую тензочувствительность породы. Спектральные исследования зарегистрированных сигналов показали, что повышение температуры вызывает смещение спектральных максимумов в низкочастотную область. Выявлена связь между размером пор и частотой затухания ультразвукового сигнала. Разработаны новые подходы к управлению акустической тензочувствительностью горных пород и повышению надежности измерений напряжений для обеспечения устойчивости подземных сооружений.

Горная порода, пористость, ультразвук, температура, продольная волна, поперечная волна, одноосная нагрузка

DOI: 10.15372/FTPRPI20200503

Акустические характеристики горных пород определяются комплексом внутренних и внешних факторов. К первым относятся минеральный и химический состав, особенности генезиса и строения. Значительное влияние на акустические характеристики геоматериала оказывают разномасштабная структурная поврежденность, наличие и параметры имеющихся в нем пор, заполняющих их флюидов и др.

Группу внешних факторов образуют поля различной физической природы, приводящие к постгенетическим изменениям свойств горной породы. Главную роль играют поля механических напряжений и температур. Они проявляются во всех типах горных пород, причем тем значительнее, чем больше глубина их залегания. Эти поля взаимно влияют друг на друга и опосредованно практически на все физико-механические и, в частности, акустические свойства горных пород. Важнейшими из таких свойств являются скорости распространения продольных V_p и поперечных V_s волн, которые позволяют определить динамические модули упругости

[1–3], а также, используя соответствующие корреляционные связи, оценивать прочностные, плотностные и другие свойства геосреды, степень ее однородности, анизотропию и напряженно-деформированное состояние [4–14].

Взаимное влияние температуры и механических напряжений на скорости упругих волн изучается для пород, залегающих на глубинах свыше 3000 м, где и температура, и напряжения являются существенными. В подобных исследованиях стараются воссоздать естественные условия залегания пород. Так, в [15] рассматривается влияние гидростатического давления (до 600 МПа) и температуры (до 600 °С) на значения скоростей упругих волн в силикатных и кальцитовых породах. В [16] приводятся результаты влияния независимого трехосного нагружения (до 600 МПа) и температуры (до 600 °С) на параметры ультразвуковых колебаний в метаморфических породах. В [17] показано изменение V_p и V_s в вулканических породах различной плотности под влиянием гидростатического нагружения (до 100 МПа) и нагрева (до 600 °С). Во всех случаях отмечается нелинейное повышение скорости упругих волн с ростом нагрузки и снижение скорости при повышении температуры.

Наряду с исследованием параметров распространения упругих колебаний при высоких значениях механических напряжений и температур интерес также представляет влияние на продольные и поперечные волны напряжений, характерных для небольших глубин (до 500 м), и температур, которые можно создать на участке массива искусственно (до 100 °С). Для изучения поля напряжений вблизи горных выработок используется метод ультразвукового межскважинного прозвучивания. В случае если выработки залегают на относительно небольшой глубине, приращения скоростей упругих колебаний могут оказаться незначительными и сравнимыми с погрешностями приборов. С другой стороны, обеспечение локального нагрева зоны ультразвуковых измерений приводит к снижению абсолютных значений скоростей и увеличению приращения V_p и V_s с ростом давления. При этом нельзя не учитывать другие обстоятельства, влияющие на значения V_p и V_s . Для осадочных пород наибольшее влияние на продольные и поперечные волны оказывает пористость.

Цель настоящей работы — изучение закономерностей влияния механического одноосного напряжения и температуры на параметры P и S волн в образцах известняка с существенно различной пористостью. Установление таких закономерностей может стать основой для разработки подходов к управлению акустической тензочувствительностью геосреды и дальнейшего развития ультразвуковых методов контроля напряжений в приконтурном массиве горных пород.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные исследования проводились на специально разработанном стенде, позволяющем выполнять измерения параметров продольных и сдвиговых колебаний в контролируемых термобарических условиях [18]. Лабораторная установка состоит из трех основных блоков: термического, предназначенного для термического нагружения и поддержания заданной температуры исследуемого образца, блока одноосного механического нагружения образца и блока ультразвуковых измерений.

Термический блок основан на применении полупроводниковых термоэлектрических элементов (ТЕС). Восемь ТЕС расположены на боковых гранях исследуемого образца и снабжены термисторами обратной связи для поддержания заданной температуры. Общий вид лабораторной установки представлен на рис. 1.

Блок ультразвуковых измерений состоит из акустических преобразователей, способных излучать и принимать как продольные, так и поперечные волны. Преобразователи являются широкополосными с центральной частотой $f_c = 500$ кГц. На излучающий преобразователь подавался сигнал с генератора импульсов в виде меандра амплитудой до 300 В. Сигнал, прошедший

через образец, поступал с приемного преобразователя на вход аналого-цифрового преобразователя Е20-10 с частотой дискретизации 5 МГц, подключенного к персональному компьютеру. Длина записи составляла 1024 отсчета (205 мс) Определение V_s и V_p происходило в автоматизированном режиме в результате осреднения результатов 20 последовательных измерений.

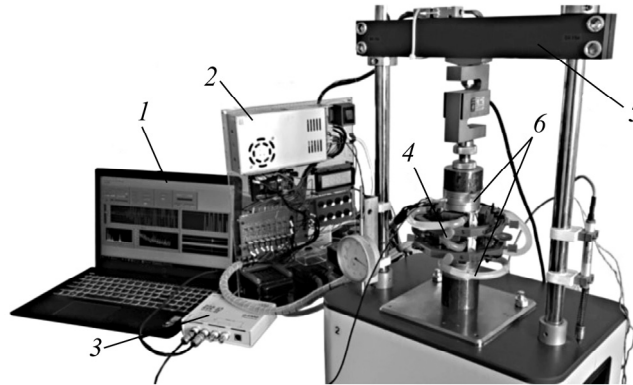


Рис 1. Общий вид лабораторного стенда: 1 — персональный компьютер; 2 — блок управления ТЭС; 3 — АЦП; 4 — блок нагрева образца; 5 — устройство одноосного нагружения; 6 — акустические преобразователи

В исследованиях использованы известняки Касимовского (группа *A*) и Сары-Ташского (группа *B*) месторождений. Образцы изготавливались в виде прямоугольных параллелепипедов высотой 82 мм и основанием 42×42 мм. Основные характеристики образцов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика образцов

Группа	Номер образца	Высота, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³	Пористость, %
<i>A</i>	A1	82.7	42.1	42.2	15.1	2267	17.6
	A2	82.5	42.3	42.1	15.6		
	A3	82.3	42.4	42.6	14.9		
	A4	82.6	42.1	42.2	15.1		
	A5	82.7	42.6	42.4	15.4		
<i>B</i>	B1	82.6	42.2	42.1	42.1	1846	29.3
	B2	82.4	42.4	42.1	41.4		
	B3	82.9	42.3	42.3	42.4		
	B4	82.3	42.3	42.3	41.0		
	B5	82.6	42.1	42.2	41.3		

Отдельное внимание уделялось оценке пористости исследуемых образцов. Различие в плотностях образцов групп *A* и *B* обусловлено существенными отличиями в пористости. Указанные отличия могут наблюдаться визуально на аншлифах породы, представленных на рис. 2а и б. Более детальное изучение пористости проводилось с помощью электронно-оптической системы Thixomet Pro, позволяющей на основании анализа цифрового изображения поверхности образца оценить соотношение размеров пор. Усредненные по группам результаты оптического анализа пористости приведены на рис. 2в.

Перед испытанием образцы выдерживали две недели при комнатной температуре и относительной влажности воздуха 30%. Испытания проходили по следующей схеме. На образце закреплялось устройство термического нагружения, после чего к его противоположным торцам приклеивались акустические преобразователи с помощью высокотемпературной эпоксидной смолы. Клеевое соединение необходимо для эффективной передачи сдвиговых колебаний на границе “преоб-

разователь – образец”. Подготовленный таким образом образец размещался на прессе. Процесс испытаний состоял из ступенчатого увеличения температуры T при фиксированном уровне одноосной нагрузки σ . Измерения параметров ультразвуковых сигналов проводилось в диапазоне температур 20–100°C с шагом 10 °C на ступенях давления 0, 3, 6 и 9 МПа. Перед повышением давления до следующего уровня образец полностью охлаждался до 20 °C.

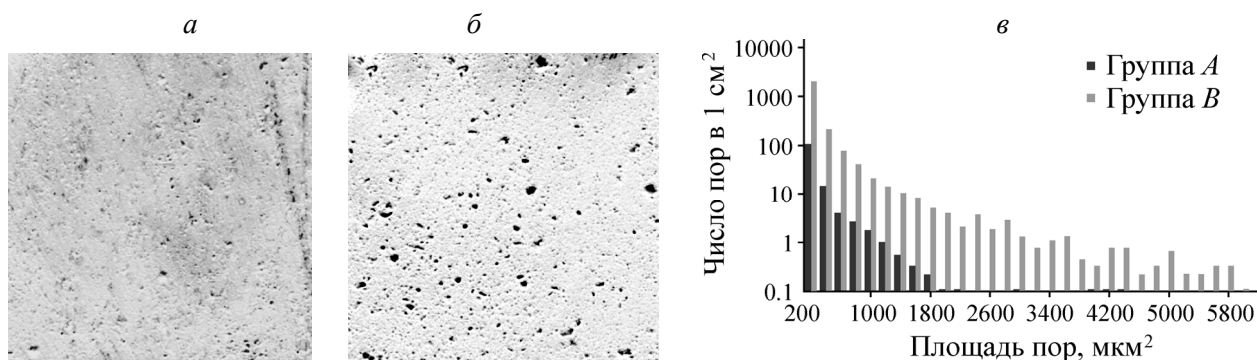


Рис. 2. Аншлифы образцов группы А (а) и В (б) и результаты оптического анализа пористости (в)

Стадии термобарического нагружения схематично показаны на рис. 3. На каждой стадии выполнялось измерение V_p и V_s . При нагреве до заданной температуры важным является момент достижения температурного равновесия между поверхностью и центром образца, т. е. необходимо удостовериться в полном и равномерном прогреве горной породы. В данном случае установление термического равновесия проводилось косвенным способом. В процессе нагрева непрерывно измерялась скорость продольной волны с частотой 1 раз в секунду. Полный нагрев образца определялся по насыщению графика зависимости скорости продольной волны от времени [19]. Наблюдалось запаздывание выполаживания указанной зависимости относительно измеренной температуры на поверхности образца в среднем на 300–400 с.

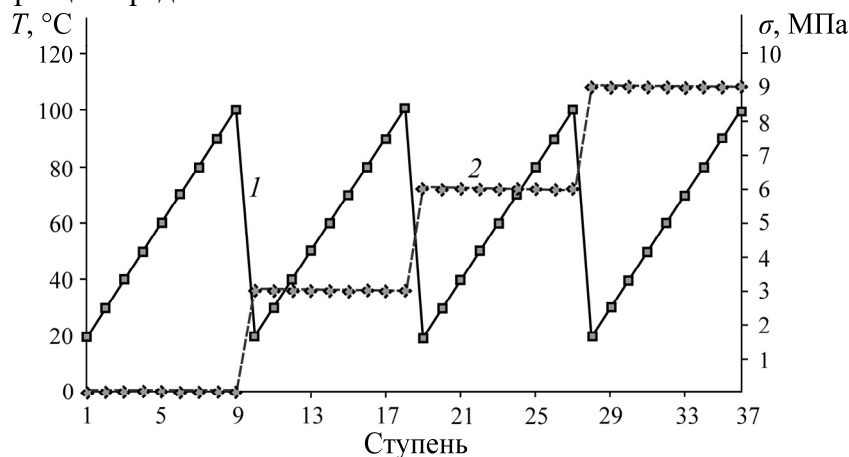


Рис. 3. Программа термобарического нагружения образцов: 1 — T , °C; 2 — σ , МПа

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате испытания образца формировался массив данных значений V_p и V_s при различных сочетаниях T и σ . Такой массив может быть представлен в трехмерном виде и аппроксимирован функцией

$$y = a_0 + a_1 T + a_2 \sigma + a_3 T^2 + a_4 T \sigma + a_5 \sigma^2, \quad (1)$$

где y — используемый информативный параметр (V_p и V_s).

Аппроксимация для всех зависимостей проводилась методом наименьших квадратов. Для оценки качества аппроксимации использовался коэффициент детерминации R^2 , для исследованных образцов параметр R^2 не опускался ниже 0.96.

На рис. 4 представлены примеры зависимостей $V_p(T, \sigma)$ для образцов групп *A* и *B*, а также результаты аппроксимации. Исходные ($T = 20$ °С; $\sigma = 0$ МПа) значения для скорости продольной волны $V_p^{init} = 3925$ м/с образцов группы *A* и 2963 м/с группы *B*. Более низкие значения V_p^{init} для образцов группы *B* обусловлены наличием в них пор, больших по размеру и количеству.

Для обоих типов известняков увеличение температуры приводит к снижению V_p , а увеличение осевой нагрузки — к увеличению V_p . Это в значительной мере согласуется с [15, 20–22]. При высоких температурах изменение давления приводит к большему приращению V_p . Для оценки такого приращения определен показатель

$$\Delta V_p^T = V_{p\max}^T - V_{p\min}^T, \quad (2)$$

где $V_{p\max}^T$ — максимальная зарегистрированная скорость продольной волны в диапазоне исследуемых давлений при заданной температуре T ; $V_{p\min}^T$ — минимальная зарегистрированная скорость продольной волны в диапазоне исследуемых давлений при заданной температуре T .

Так, для образца группы *A* $\Delta V_p^{20^\circ\text{C}} = 77$ м/с (1.83 %), $\Delta V_p^{100^\circ\text{C}} = 177$ м/с (4.72 %), для образца группы *B* $\Delta V_p^{20^\circ\text{C}} = 115$ м/с (3.88 %), $\Delta V_p^{100^\circ\text{C}} = 191$ (6.76 %). На скорость продольной волны влияет как общая пористость [23], так и размер пор [24]. Увеличение этих параметров снижает значения V_p . Отмечен нелинейный характер роста V_p с увеличением σ в пористом известняке группы *B*. Степень нелинейности в данном случае можно оценить по коэффициенту a_5 регрессионной модели (1). Для породы группы *B* он существенно больше ($a_5 = 1.083$), чем для породы группы *A* ($a_5 = 0.4815$).

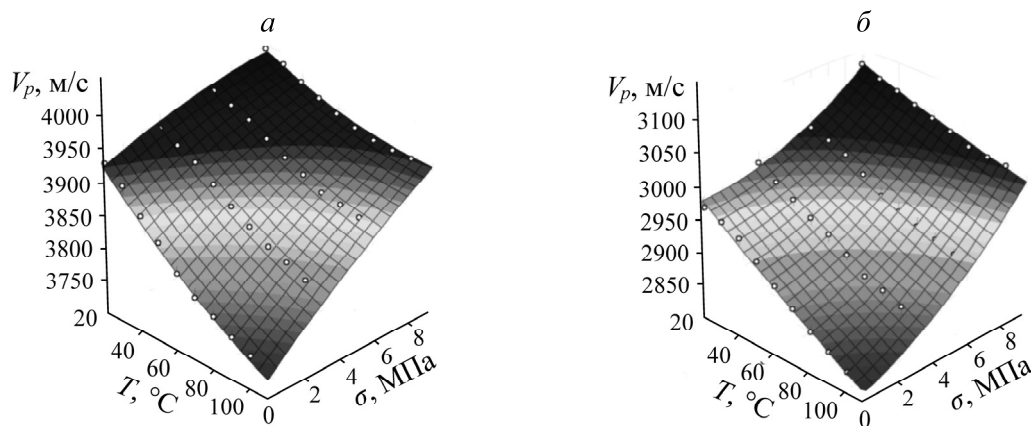


Рис. 4. Изменение скорости продольной волны в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп *A* (а) и *B* (б)

Результаты измерения V_s показали схожие с V_p особенности. На рис. 5 приведены примеры зависимостей $V_s(T, \sigma)$ для образцов групп *A* и *B* и результаты аппроксимации. Исходные ($T = 20$ °С; $\sigma = 0$ МПа) значения скоростей поперечных волн $V_s^{init} = 2233$ м/с для образцов группы *A* и $V_s^{init} = 1587$ м/с группы *B*. Значения приращений V_s для породы группы *A* составили $\Delta V_s^{20^\circ\text{C}} = 25$ м/с (1.11 %), $\Delta V_s^{100^\circ\text{C}} = 79$ м/с (4.22 %). Для пористого известняка группы *B* прира-

щения V_s более значительны: $\Delta V_s^{20^\circ\text{C}} = 69$ м/с (4.35 %), $\Delta V_s^{100^\circ\text{C}} = 211$ м/с (16.4 %). Также более значительно выражена нелинейность роста V_s при увеличении σ во всем диапазоне температур для пористых известняков группы *B*. Для указанной группы значение $a_5 = 0.537$, в то время как в породах группы *A* нелинейность практически не наблюдается ($a_5 = 0.046$).

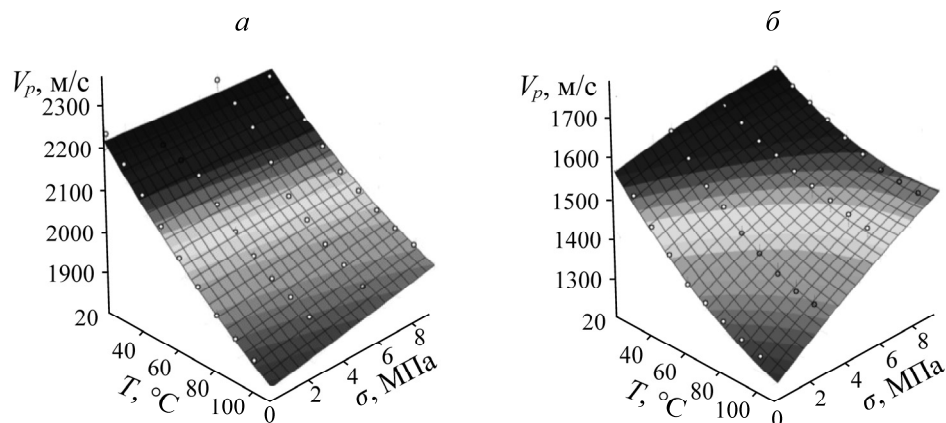


Рис. 5. Изменение скорости поперечной волны в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп *A* (а) и *B* (б)

Экспериментально сформированные массивы значений $V_p(T, \sigma)$ и $V_s(T, \sigma)$ позволяют рассчитать значения динамических модулей упругости E_d для образцов групп *A* и *B* в соответствии с [25]:

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (3)$$

где ρ — плотность; V_p и V_s — измеренные значения скоростей продольной и сдвиговой волн.

На рис. 6 представлены примеры зависимостей $E_d(T, \sigma)$ для образцов групп *A* и *B* и результаты аппроксимации в соответствии с выражением (1).

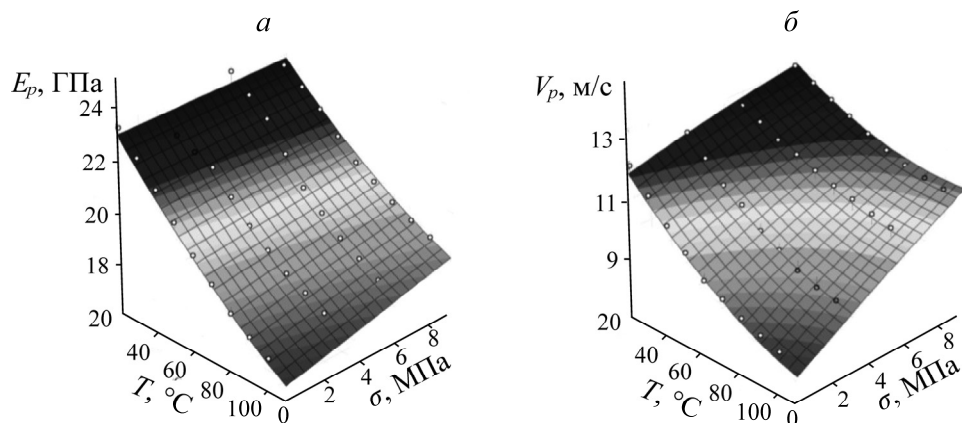


Рис. 6. Изменение динамического модуля упругости в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп *A* (а) и *B* (б)

Из выражения (3) следует, что значения E_d в значительной степени зависят от V_s и в меньшей степени от V_p . Это объясняет общее сходство зависимостей $E_d(T, \sigma)$ и $V_s(T, \sigma)$. Исходные ($T=20$ °С; $\sigma=0$ МПа) значения динамического модуля упругости $E_d^{init} = 23.21$ ГПа для образ-

цов группы *A* и $E_d^{init} = 12.08$ группы *B*. Значения приращений $\Delta E_d^{20^\circ C} = 0.16$ ГПа (0.7%) для породы группы *A*, $\Delta E_d^{100^\circ C} = 1.51$ ГПа (8.8%). Для пористого известняка группы *B* приращения $\Delta E_d^{20^\circ C} = 1.05$ ГПа (8.67%), $\Delta E_d^{100^\circ C} = 2.7$ ГПа (32.2%).

При применении ультразвуковых методов для оценки степени дефектности различных материалов чаще всего используются такие информативные параметры, как скорость и амплитуда продольных и, реже, поперечных волн. Дополнительную информацию о степени и характере нарушений в образце, особенно о ее динамике, возможно получить при использовании спектрального анализа принятых сигналов [26, 27]. Чаще всего в качестве информативных параметров выступают значения ширины спектра ΔF , а также частота спектрального максимума F_{max} . Так, в [28] отмечается снижение указанных параметров при увеличении степени нарушенности породы.

В настоящей работе зарегистрированные волновые формы также подвергались спектральной обработке. Спектральный анализ заключался в построении спектрограмм сигналов, где по горизонтальной оси откладывались значения осевого давления, по вертикальной — частоты акустических сигналов, а цветом кодировались амплитуды. Спектрограммы получены путем последовательного построения нормированных спектров сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье. Построение спектрограмм проводилось отдельно для разных ступеней температуры, после чего формировалось итоговое изображение, характеризующее изменение спектральной композиции сигналов в зависимости от различных давлений и температур. На рис. 7 представлены примеры таких комплексных спектрограмм, полученных для образцов групп *A* и *B*.

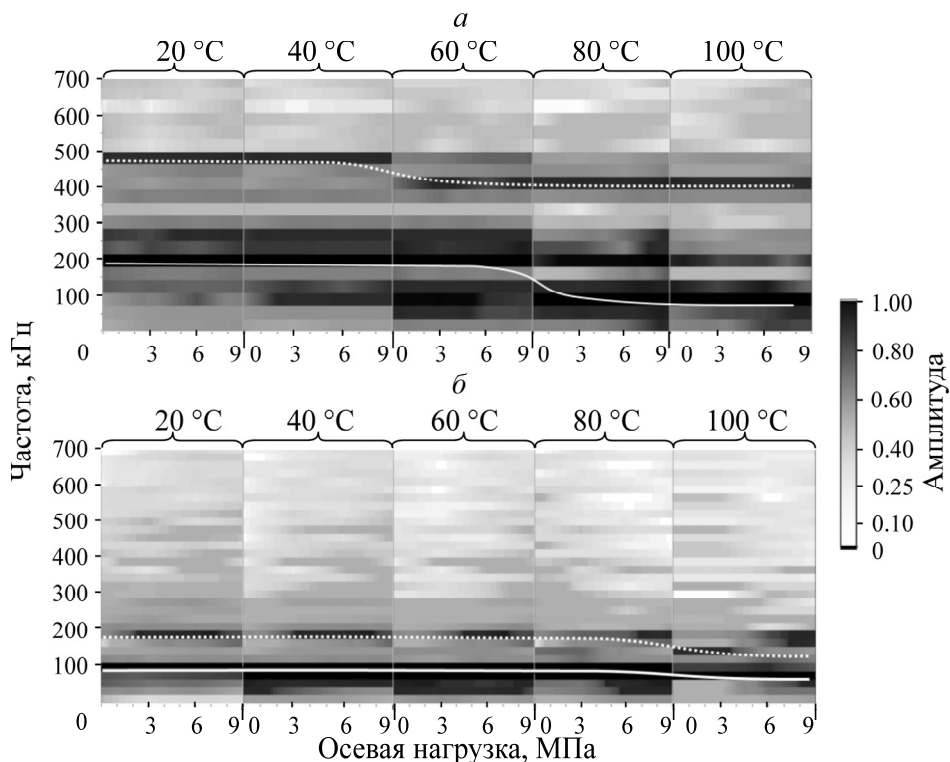


Рис. 7. Изменение спектрального состава ультразвуковых сигналов при изменении осевой нагрузки и температуры для образцов группы *A* (а) и *B* (б)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для всех исследованных образцов характерно снижение скоростей распространения упругих колебаний с ростом температуры и увеличение скоростей с ростом осевой нагрузки. Увеличение скорости упругих колебаний с ростом давления является известным и широко используемым феноменом [29–31]. Увеличение скоростей P -волн объясняется уплотнением структуры породы, закрытием трещин и пор. Увеличение скоростей S -волн с ростом механических напряжений также наблюдается, однако в меньшей степени. Природа сдвиговых волн (их зависимость от модуля сдвига G) определяет их большую чувствительность не к величине раскрытия трещин или размеру пор, а к факту их присутствия и типу заполнителя (S -волны не распространяются в жидкостях и газах).

Точный механизм влияния температуры на скорости распространения упругих колебаний в горных породах установить сложнее. Снижение скоростей с ростом температуры часто объясняют образованием микротрещин [32]. Во всех исследованных образцах отмечается рост чувствительности V_p и V_s к осевой нагрузке с ростом температуры. Для образцов пористого известняка группы B увеличение чувствительности V_p проявляется более отчетливо, чем в образцах более однородного известняка группы A . Еще большая разница наблюдается между группами A и B при измерении V_s . Увеличение температуры приводит к значительному росту приращения значений V_s , особенно в пористых известняках. Это свидетельствует об образовании под действием температуры множества почти сомкнутых трещин, которые оказывают наибольшее влияние на скорость поперечной волны. Таким образом, рост температуры способствует увеличению акустической тензочувствительности ε_{ps} породы — показателя, определяющего приращение скорости упругой волны (P или S) при увеличении осевой нагрузки:

$$\varepsilon_{ps} = \frac{\Delta V_{ps}}{\Delta \sigma}, \quad (4)$$

где ΔV_{ps} — приращение скорости продольной или поперечной волны; $\Delta \sigma$ — приращение осевой нагрузки.

Возможность искусственного увеличения ε_{ps} позволит повысить точность оценок напряжений, получаемых in-situ ультразвуковыми методами. Это может оказаться критически важным при реализации ультразвуковых измерений напряжений на малых глубинах, где давления относительно невелики и не приводят к существенным изменениям V_p и V_s . В пористых породах нагрев вызывает более значительный рост чувствительности. В табл. 2 представлены сводные результаты испытаний образцов.

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытания образцов

Группа	Номер образца	V_p^{init}	V_s^{init}	$\varepsilon_p^{20^\circ C}$	$\varepsilon_p^{100^\circ C}$	$\varepsilon_s^{20^\circ C}$	$\varepsilon_s^{100^\circ C}$
		м/с		м/(с·МПа)			
A	A1	3925	2233	8.56	19.67	2.78	8.78
	A2	3935	2233	7.22	20.11	2.67	8.89
	A3	3923	2247	7.89	18.78	2.00	8.44
	A4	3932	2250	9.11	19.56	3.00	9.22
	A5	3918	2244	7.67	16.78	2.22	7.78
B	B1	2963	1587	12.78	21.22	7.67	23.44
	B2	2961	1580	11.67	21.44	7.89	24.56
	B3	2975	1578	14.22	20.78	6.56	22.78
	B4	2982	1594	11.22	18.33	7.11	24.78
	B5	2990	1589	11.89	19.33	7.11	24.11

Спектральный анализ зарегистрированных сигналов также показывает существенную разницу между образцами групп *A* и *B*. В пористых известняках группы *B* наблюдается значительное снижение амплитуд высокочастотных составляющих спектра во всем диапазоне исследованных давлений и температур. Это связано с наличием и размером пор. В [33] указывается на различие между механизмами рассеяния акустических сигналов на порах при различных соотношениях длины волны λ и характерного радиуса поры R . Так, при $\lambda > 2R$ наблюдается рэлеевское рассеяние, при $\lambda = 2R$ происходит стохастическое рассеяние. В случае $\lambda \gg 2R$ среду можно рассматривать как однородную и рассеяние не наблюдается. В [34] приводится подробный анализ влияния размеров и конфигурации пор на частотные характеристики ультразвуковых сигналов: в пористой среде существует предельная частота (частота среза f_s), выше которой упругие колебания испытывают настолько сильное рассеяние, что практически перестают распространяться. Значение f_s можно оценить из выражения

$$f_s = \frac{V_p}{20R}. \quad (5)$$

На рис. 8 приведены рассчитанные по (5) теоретические значения f_s в зависимости от размеров пор для образцов групп *A* и *B*. Для упрощения форма пор принята за сферу.

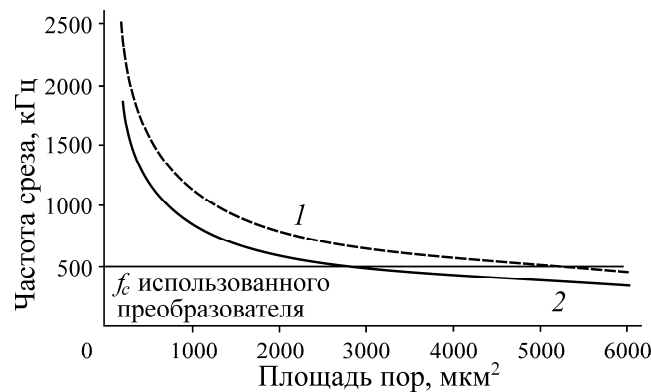


Рис. 8. Частота среза f_s в зависимости от размера пор для образцов группы *A* (1) и *B* (2)

Для образцов группы *A* размер пор не превышает 1800 мкм² (рис. 2в). Центральная частота использованных преобразователей f_c лежит ниже расчетной частоты среза f_s . Это проявляется в наличии спектрального максимума в районе 500 кГц для образца группы *A* при $T=20^\circ\text{C}$ и $\sigma=0$ МПа (рис. 7а). Такого спектрального максимума на 500 кГц не наблюдается для образца группы *B* (рис. 7б), что объясняется существенным рассеянием высокочастотных составляющих сигнала на порах большего размера. Для известняков группы *B* площадь пор достигает до 5800 мкм² (рис. 2в). Значения частоты среза оказываются ниже центральной частоты используемых преобразователей (рис. 8), что приводит к практически полной потере высокочастотных составляющих.

С ростом температуры для образцов обеих групп наблюдается смещение спектральных максимумов в высокочастотном и низкочастотном диапазоне (сплошная и пунктирная линии на рис. 7). Подобное смещение происходит даже при отсутствии осевой нагрузки и, вероятнее всего, связано со снижением упругих модулей пород с ростом температуры. В [35] также отмечается снижение максимума спектра ультразвуковых сигналов с увеличением температуры при испытании бетонов.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что в исследованных породах увеличение осевой нагрузки вызывает рост скоростей распространения продольных и в меньшей степени поперечных упругих волн, что связано с закрытием существующих пор и трещин. Увеличение температуры, наоборот, приводит к снижению указанных скоростей за счет роста дефектности в образце под действием термических напряжений. Рост температуры способствует смещению спектральных пиков в область низких частот, что обусловлено образованием новых трещин, которые выступают в роли фильтров низких частот. Установлена взаимосвязь между размерами пор и затуханием ультразвука на высоких частотах. Увеличение размеров пор с 1800 до 5800 мкм² приводит к практически полной потере спектральных составляющих выше 500 кГц, что подтверждает теоретическую связь между размером пор и частотой среза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что локальный нагрев горной породы можно использовать для повышения ее акустической тензочувствительности, например, за счет размещения между излучателем и приемником на участке каротажных измерений в массиве специального нагревательного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Christaras B., Auger F., and Mosse E.** Determination of the moduli of elasticity of rocks, Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods, *Materials and Structures*, 1994, 27(4). — P. 222–228.
2. **Gurevich B., Makarynska D., and Pervukhina M.** Ultrasonic moduli for fluid-saturated rocks: Mavko-Jizba relations rederived and generalized, *Geophysics*, 2009, 74(4). — P. 25–30.
3. **Yasar E. and Erdogan Y.** Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2004, 41. — P. 871–875.
4. **Kahraman S.** Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2001, 38. — P. 981–994.
5. **Karakul H. and Ulusay R.** Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2013, 46. — P. 981–999.
6. **Назарова Л. А., Назаров Л. А., Голиков Н. А.** Оценка реологических свойств пород-коллекторов пластов Баженовской свиты по данным термобарических испытаний // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 22–28.
7. **O'Connell R. J. and Budiansky B.** Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, *J. Geophys. Res.*, 1974, 79. — P. 5412–5426.
8. **Takato T. and Masanobu O.** Changes in crack density and wave velocity in association with crack growth in triaxial tests of Inada granite, *J. Geophys. Res.*, 2005, 110(5). — P. 1–14.
9. **Johnston J. E. and Christensen N. I.** Seismic anisotropy of shales, *J. Geophys. Res.*, 1995, 100. — P. 5991–6003.
10. **Kim H., Cho J. W., Song I., and Min K. B.** Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea, *Eng. Geology*, 2012. 147–148. — P. 68–77.
11. **Gladwin M. T. and Stagey F. D.** Ultrasonic pulse velocity as a rock stress sensor, *Tectonophysics*, 1974, 21 (1–2). — P. 39–45.

12. **Gladwin M. T.** Ultrasonic stress monitoring in underground mining, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(5). — P. 221–228.
13. **Tian J. and Wang E.** Ultrasonic method for measuring in-situ stress based on acoustoelasticity theory. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao, Chinese J. of Rock Mech. and Eng.*, 2006, 25(SUPPL. 2). — P. 3719–3724.
14. **Захаров В. Н., Назарова Л. А., Протасов М. И., Назаров Л. А., Панов А. В., Аверин А. П.** Оценка горизонтальных компонент внешнего поля напряжений шахты “Воркутинская” по данным сейсмической томографии // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — P. 23–31.
15. **Punturo R., Kern H., Cirrincione R., Mazzoleni P., and Pezzino A.** P- and S-wave velocities and densities in silicate and calcite rocks from the Peloritani Mountains, Sicily (Italy): The effect of pressure, temperature and the direction of wave propagation, *Tectonophysics*, 2005, 409(1-4). — P. 55–72.
16. **Motra H. B. and Zertani S.** Influence of loading and heating processes on elastic and geomechanical properties of eclogites and granulites, *J. Rock Mech. and Geotech. Eng.*, 2018, 10(1). — P. 127–137.
17. **Scheu B., Kern H., Spieler O., and Dingwell D. B.** Temperature dependence of elastic P- and S-wave velocities in porous Mt. Unzen dacite, *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 153(1-2 SPEC. ISS.). — P. 136–147.
18. **Николенко П. В., Шкуратник В. Л.** Установка для ультразвуковых измерений на образцах геоматериалов в условиях термобарических воздействий // ГИАБ. — 2019. — № 5. — С. 89–96.
19. **Николенко П. В.** Методические вопросы установления влияния термобарических воздействий на скорость распространения ультразвуковых колебаний в горных породах // ГИАБ. — 2019. — № 9. — С. 160–167.
20. **Chen X. and Xu Z.** The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application, *Bull. of Eng. Geology and the Environment*, 2017, 76(2). — P. 661–669.
21. **Motra H. B. and Stutz H. H.** Geomechanical rock properties using pressure and temperature dependence of elastic p- and s-wave velocities, *Geotech. and Geol. Eng.*, 2018, 36(6). — P. 3751–3766.
22. **Qi K. and Tan Z.** Experimental study on acoustoelastic character of rock under uniaxial compression, *Geotech. and Geol. Eng.*, 2018, 36(1). — P. 247–256.
23. **Cheng W., Ba J., Fu L.-Y., and Lebedev M.** Wave-velocity dispersion and rock microstructure, *J. Petroleum Sci. and Eng.*, 2019, 183. – Art. Number 106466.
24. **Archilha N. L., Missagia R. M., Hollis C., De Ceia mar, McDonald S. A., Lima Neto I. A., Eastwood D. S., and Lee P.** Permeability and acoustic velocity controlling factors determined from x-ray tomography images of carbonate rocks, *AAPG Bulletin*, 2016, 100(8). — P. 1289–1309.
25. **Jaeger J. C., Cook N. G. W., and Zimmerman R. W.** *Fundamentals of rock mechanics*, 4th edn., London, Chapman & Hall, 2007. — P. 488.
26. **Santos C. A., Urdaneta V., Jaimes G., and Trujillo L.** Ultrasonic spectral and complexity measurements on brine and oil saturated Rocks, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2010, 43(3). — P. 351–359.
27. **Shamina O. G and Palenov A. M.** Elastic wave spectra and fracture. *Izvestiya — Physics of the Solid Earth.*, 2000, 36(3). — P. 196–203.
28. **Remy J.-M., Bellanger M., and Homand-Etienne F.** Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles, *Geophysics*, 1994, 59(2). — P. 245–251.
29. **Chen X. and Xu Z.** The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application. *Bull. of Eng. Geology and the Environment*, 2017, 76(2). — P. 661–669.
30. **Katsuki D., Gutierrez M., and Almrabat A.** Stress-dependent elastic wave velocity of microfractured sandstone, *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2014, 38(5). — P. 441–456.

31. **Zheng G. P. and Zhao X. D.** Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading. Dongbei Daxue Xuebao, J. of Northeastern University, 2009, 30(8). — P. 1197–1200.
32. **Kern H.** Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at elevated pressures and temperatures. In: Hellwege K.-H. (Ed.), Landolt-Boernstein, 1982. — P. 99–140.
33. **Mavko G. M., Mukerji T., and Dvorkin J.** The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media, Cambridge, Cambridge University Press, 2009. — P. 524.
34. **Sarout J.** Impact of pore space topology on permeability, cut-off frequencies and validity of wave propagation theories, Geophysical J. Int., 2012, 189(1). — P. 481–492.
35. **Ren W., Xu J, Zhang Z., and Liu Y.** Wavelet packet analysis on acoustic spectral characteristics of geopolymeric concrete after elevated temperature, Jianzhu Cailiao Xuebao, J. of Building Materials, 2014, 17(2). — P. 284–290.

Поступила в редакцию 30/VII 2020

После доработки 14/VIII 2020

Принята к публикации 11/ IX 2020