

АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМОЕ ЗАТУХАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СУХОМ И ВОДОНАСЫЩЕННОМ ПЕСЧАНИКЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Э.И. Машинский

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Представлены результаты экспериментов по изучению амплитудно-частотной зависимости затухания P - и S -волн в сухом и водонасыщенном песчанике при гидростатическом давлении 20 МПа. Изменения проводились на образцах методом отраженных волн на частоте импульса 1 МГц в амплитудном диапазоне $\varepsilon \sim (0.3—2.0) \cdot 10^{-6}$. Декремент затухания P -волны Q_P^{-1} в сухом песчанике и S -волны Q_S^{-1} в сухом и водонасыщенном песчанике обратно пропорционально зависит от амплитуды. Q_P^{-1} в водонасыщенном песчанике не зависит от амплитуды. Релаксационные спектры затухания (РСЗ) S -волны для сухого и водонасыщенного состояний существенно различаются между собой, тогда как РСЗ P -волны не имеют такого различия. Амплитудная вариация вызывает изменение в величине релаксационной силы, смещение РСЗ по оси затухания, а также сдвиг РСЗ S -волны относительно РСЗ P -волны в сторону высоких частот. Увеличение амплитуды ведет к значительному уменьшению (до 40 %) ширины релаксационного пика S -волны в водонасыщенном песчанике. Необычное поведение затухания под влиянием амплитудного фактора объясняется совместным действием вязкоупругого и микропластического механизмов. Эти результаты могут быть использованы для улучшения методов геологической интерпретации акустических и сейсмических данных.

Неупругость, нелинейное соотношение напряжение—деформация, неупругие сейсмические параметры, релаксационные спектры, амплитудно-зависимые скорость волны и затухание.

STRAIN AMPLITUDE-DEPENDENT ATTENUATION OF P AND S WAVES IN DRY AND WATER-SATURATED SANDSTONE UNDER CONFINING PRESSURE

E.I. Mashinskii

The dependence of P - and S -wave attenuation on strain amplitude and frequency has been studied experimentally in dry and water-saturated sandstone samples under a confining pressure of 20 MPa. Attenuation of P and S reflections was measured at a frequency of 1 MHz in a strain range of $\varepsilon \sim (0.3—2.0) \cdot 10^{-6}$. The measured P -wave attenuation (Q_P^{-1}) in dry sandstone and S -wave attenuation (Q_S^{-1}) in dry and saturated samples turned out to be inversely proportional to strain amplitude while Q_P^{-1} in saturated sandstone showed no strain dependence. The frequency-dependent attenuation spectra in dry and saturated sandstone differed considerably in S waves but were generally similar for P reflections. Strain amplitude variations were found out to influence the frequency dependence of attenuation and to shift the relaxation spectra of S waves toward high frequencies relative to those of P waves. As strain increased, the S -wave attenuation peak in saturated sandstone became notably (to 40%) narrower. The unusual strain amplitude-dependent behavior of attenuation may be due to joint action of viscoelastic and microplastic mechanisms. The reported results may be useful for improving geological interpretation of acoustic and seismic data.

Anelasticity, nonlinear stress-strain relation, hysteresis, anelastic seismic parameters, relaxation spectra, strain amplitude dependence of wave velocity and attenuation

ВВЕДЕНИЕ

Изучение амплитудных эффектов в акустике и сейсмике имеет продолжительную историю, но относительно недавно было установлено необычное поведение скоростей волн и затухания в зависимости от амплитуды [Машинский и др., 1999; Zaitsev et al., 1999; Mashinskii, 2004, 2005a,b; Зайцев, Матвеев, 2006; Машинский, 2007]. В лабораторных и полевых экспериментах, используя методику циклического изменения амплитуды, было показано, что скорость волны с увеличением амплитуды возрастает, а затухание волны падает. Это противоречит ранее известным данным, в которых наблюдалось только уменьшение скорости и увеличение затухания с ростом амплитуды [Winkler et al., 1979; Winkler, Plona, 1982; Winkler, 1983, 1985; Stewart et al., 1983; Tutuncu et al., 1994, 1998; Johnson et al., 1996; Zinszner et al., 1997; Ostrovsky, Johnson, 2001]. Новые данные расширяют представления о влиянии амплитудного фактора на скорость распространения и затухание волн, показывая все возможности ее поведения (увеличение, уменьшение и независимость от величины амплитуды). Эти результаты получили поддержку в ряде теоретических работ, в которых были предложены новые механизмы затухания упругих волн [Zaitsev et al., 2003; Зайцев, Матвеев, 2006; Mashinskii, 2006; Fillinger, 2006].

Уточненные данные о поведении скоростей волн и затухания послужили основой для постановки дальнейших исследований по амплитудной зависимости затухания волн с использованием того же самого методического приема. В результате этих работ были обнаружены новые факты поведения амплитудно-зависимого декремента затухания [Mashinskii, 2005a]. В экспериментах на песчаниках и других породах был обнаружен эффект повышения добротности Q материала, который появляется при увеличении интенсивности излучения. Это сопровождается уменьшением затухания по нелинейному закону. Дальнейшее изучение амплитудных эффектов показало неожиданные результаты поведения релаксационных спектров затухания при различных уровнях импульсных амплитуд [Mashinskii, 2006]. Были обнаружены такие явления, как сдвиг релаксационных спектров затухания продольных и поперечных волн по осям частот и инверсной добротности, изменение ширины релаксационного спектра и др. Подобные эффекты без учета влияния амплитудного фактора были известны и ранее для некоторых поликристаллов. Например, в оливине вариация затухания сдвиговой волны происходит не только с изменением частоты, но и температуры, средним размером зерна и содержанием мягкой фракции [Jackson et al., 2004]. Эти эффекты обнаружены в низкочастотном диапазоне. Для ультразвуковых частот имеет место пик затухания продольной волны, который сдвигается с изменением насыщения материала [Taylor, Knight, 2003].

На основе этих и других явлений могут быть созданы новые диагностические методы для решения прикладных задач акустического каротажа, сейсмической разведки и др. [Dvorkin et al., 2003; Mavko, Dvorkin, 2005]. Данная статья представляет экспериментальное изучение амплитудных эффектов затухания в сухом и водонасыщенном песчанике, находящемся под гидростатическим давлением. Изучение влияния амплитуды на релаксационные спектры затухания представляет большой интерес для понимания дисперсионных механизмов.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Эксперименты выполнены на образцах песчаника (с глубины 2250 м) при гидростатическом давлении 20 МПа и комнатной температуре. Образцы имеют цилиндрическую форму диаметром 4 см и длиной 2 см. Плотность породы составляет 2,2 г/см³, пористость 15 %. Порода испытывалась в двух состояниях: сухом и водонасыщенном (около 70 %).

Аппаратура, используемая в экспериментах, является стандартной для такого рода исследований и применяется во многих работах [Winkler, 1983; Jones, 1995; Машинский, 2006]. Это трехслойная модель, в которой первый, третий слои являются линией задержки и демпфером, они выполнены из бериллиевой бронзы. Это обеспечивает идентичное отражение продольной и поперечной волн от границ раздела. Исследуемая порода находится между этими слоями. Возбуждение и прием ультразвуковых импульсов на частоте около 1 МГц осуществляется с помощью пьезокерамических датчиков, поляризованных на продольную и поперечную волны. Каждый датчик является комбинированной парой источник—приемник.

Декремент затухания вычислялся, используя соотношение [Winkler, 1983]

$$Q^{-1} = \alpha V / 8.686\pi f = \alpha \lambda / 8.686\pi, \quad (1)$$

где α — коэффициент поглощения, дБ/м, V — фазовая скорость, м/с и f — частота, Гц. Величина α вычисляется из соотношения [Winkler, Plona, 1982]

$$\alpha(\omega) = \frac{8.686}{L} \ln \left[\frac{|R_{23}| A_{top}(f)}{|R_{12}| A_{bot}(f)} (1 - R_{12}^2(f)) \right], \quad (2)$$

где L — двойная длина образца, м, $A_{top}(f)$, $A_{bot}(f)$ — амплитуды Фурье отраженного импульса от верхней и нижней границ образца соответственно, $R_{12}(f)$, $R_{23}(f)$ — коэффициенты отражения от верхней и нижней границ. В нашем случае границы являются идентичными, поэтому $R_{12}(f) = -R_{23}(f)$. Коэффициент отражения вычисляется из выражения

$$R(f) = \frac{\rho_r V_r(f) - \rho_b V_b(f)}{\rho_r V_r(f) + \rho_b V_b(f)}, \quad (3)$$

где ρ_r и ρ_b — плотности, кг/м³, $V_r(f)$ и $V_b(f)$ — скорости волн, м/с, породы и бериллиевой бронзы соответственно.

Методика изучения характеристик затухания состояла в следующем. Декремент затухания измерялся на различных амплитудах, величины которых изменялись по замкнутому циклу. Сначала амплитуда импульса дискретно увеличивалась от минимальной величины до максимальной, а затем в обратном порядке уменьшалась до исходной (минимальной) величины: $\epsilon_{\min} = \epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2 \rightarrow \dots \rightarrow \epsilon_{\max} = \epsilon_6 \rightarrow \epsilon_1$. Величины относительных деформаций в амплитуде импульса следующие: $\epsilon_1 = 0.3 \cdot 10^{-6}$, $\epsilon_2 = 0.5 \cdot 10^{-6}$,

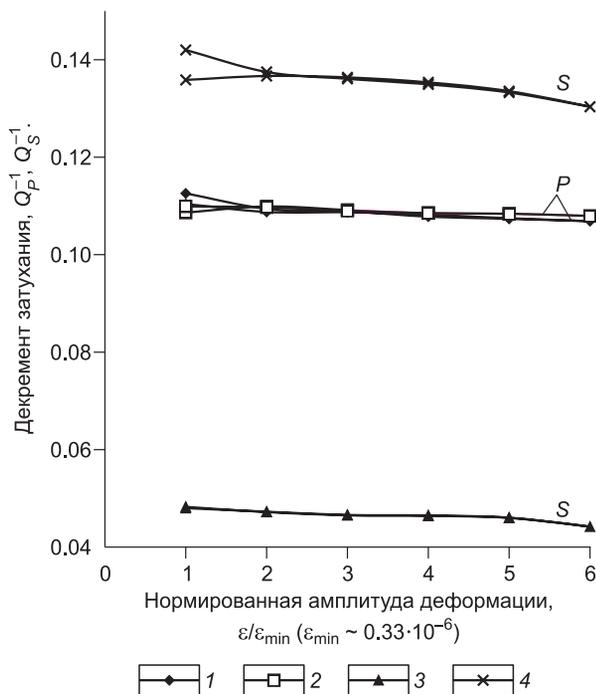
$\varepsilon_3 = 1.0 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_4 = 1.3 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_5 = 1.7 \cdot 10^{-6}$ и $\varepsilon_6 = 2 \cdot 10^{-6}$ (т.е. это относительные микродеформации). Таким образом, полный цикл ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_6 \rightarrow \varepsilon_1$) включал 11 амплитудных величин (6 восходящих и 5 нисходящих). Измерение величины затухания производилось на каждом амплитудном уровне. Спектры затухания вычислялись в полосе частот $\Delta f_{\min-\max} = 0.52 - 1.41$ МГц, свободной от дифракционных эффектов.

Диапазон амплитуд деформации и обоснование измерений. Амплитуда деформации оценивалась по формуле [Адушкин и др., 1999]: $\varepsilon_{\max} = v/V = 2\pi u/\lambda$, где v — скорость частиц, V — скорость распространения волны, u — величина смещения частиц, λ — длина волны. Величина ε_{\max} определяется также через смещение относительно четверти длины волны. В данной аппаратуре непосредственно смещение частиц или деформация не измеряются. Деформация рассчитывалась по известной величине электрического сигнала и характеристик пьезопреобразователя ЦТС и ЦТБС (модуль упругости, диэлектрическая проницаемость, КЭМС, пьезоэлектрическая постоянная деформации h). Величина h (В/м), размеры зажатой пьезопластинки, модуль упругости определяют резонансную частоту и деформацию пьезопластинки (или ее абсолютное смещение). Диапазон электрического напряжения в импульсе составляет от 10 до 60 В (шесть амплитудных величин через 10 В). На минимальной амплитуде величина смещения частиц в породе после прохождения импульса через буфер и образец составляет приблизительно $0.3 \cdot 10^{-9}$ м, а на максимальной амплитуде — в соответствии с величиной амплитуды электрического напряжения $1.8 \cdot 10^{-9}$ м. Относительные деформации в импульсе при этом составляют $\sim (0.3 - 2) \cdot 10^{-6}$. Это соответствует амплитудам деформации, полученным в работах с аналогичной аппаратурой [Winkler, Plona, 1982; Tutuncu et al., 1994].

Цель работы — установление качественных характеристик поведения затухания в зависимости от изменяющейся амплитуды. Знание примерной величины амплитуды относительной деформации является вполне удовлетворительным. Здесь изучается относительное изменение параметров затухания на различных амплитудах по отношению к исходной амплитуде $\varepsilon_{\min} = \varepsilon_1$. Изменение амплитуды (по оси абсцисс) представлено относительной величиной $\varepsilon/\varepsilon_{\min}$, где ε — текущая деформация, ε_{\min} — вычисленная деформация. По существу это относительные измерения в конкретном динамическом диапазоне ($\varepsilon_{\max}/\varepsilon_{\min} = 6$) с одним изменяющимся параметром и остальными неизменными условиями. В этом динамическом диапазоне относительные колебания параметров затухания, вызванные изменяющейся интенсивностью волны, являются достоверными. Поэтому для установления характера амплитудной зависимости затухания и их релаксационных спектров величина погрешности в определении абсолютной величины амплитуды относительной деформации не имеет принципиального значения для суждения о наличии эффекта. Наши измерения включают диапазон деформаций $10^{-7} - 10^{-6}$, известный по данным многочисленных публикаций как область нелинейных проявлений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Зависимости декремента затухания продольной и поперечной волн от амплитуды на доминантной частоте представлены на рис. 1. Величина декремента затухания продольной волны как в сухом, так и в



водонасыщенном песчанике является практически одинаковой. Затухание продольной волны слабо реагирует на изменение амплитуды. Увеличение амплитуды вызывает небольшое уменьшение затухания в сухом песчанике, в то время как в водонасыщенном — затухание остается практически неизменным. В противоположность этому наблюдается отчетливая зависимость декремента затухания от амплитуды для поперечной волны. Величина Q_S^{-1} монотонно уменьшается с увеличением амплитуды (до 8%). Абсолютная величина декремента затухания поперечной волны в водонасыщенном песчанике в три раза превышает величину затухания в сухом.

Релаксационные спектры затухания продольной волны $Q_P^{-1}(f, |\varepsilon_{1-6}|_{\text{const}})$ в сухом и водонасыщенном песчанике представлены на рис. 2. Имеется релаксационный пик затухания. Как видно из графиков,

Рис. 1. P -, S -волновое затухание в зависимости от амплитуды импульса в сухом (1, 3) и водонасыщенном (2, 4) песчанике при гидростатическом давлении 20 МПа (здесь и далее).

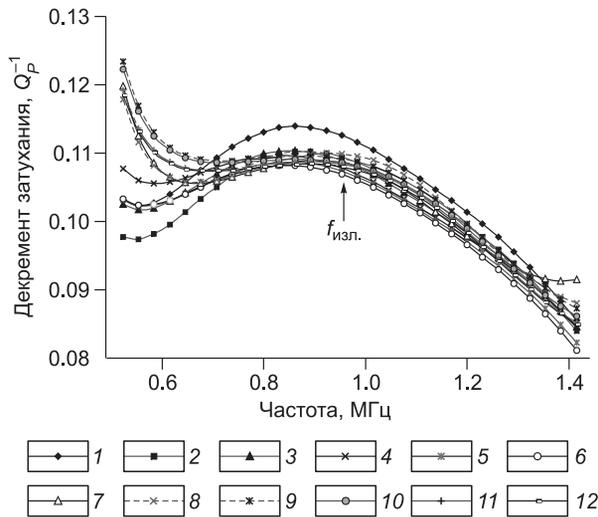


Рис. 2. Затухание продольной волны в сухом и водонасыщенном песчанике в зависимости от частоты для шести уровней амплитуды.

1–6 — сухой, с первой по шестую амплитуду последовательно; 7–12 — водонасыщенный, с первой по шестую амплитуду последовательно.

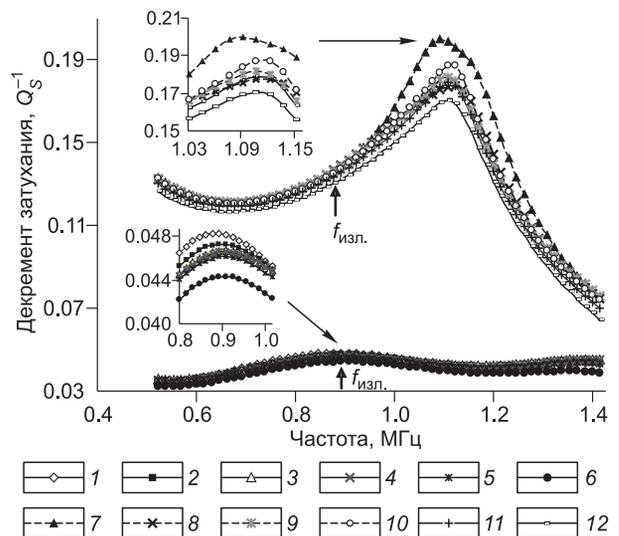


Рис. 3. Затухание поперечной волны в сухом и водонасыщенном песчанике в зависимости от частоты для шести уровней амплитуды.

1–6 — сухой, с первой по шестую амплитуду последовательно; 7–12 — водонасыщенный, с первой по шестую амплитуду последовательно.

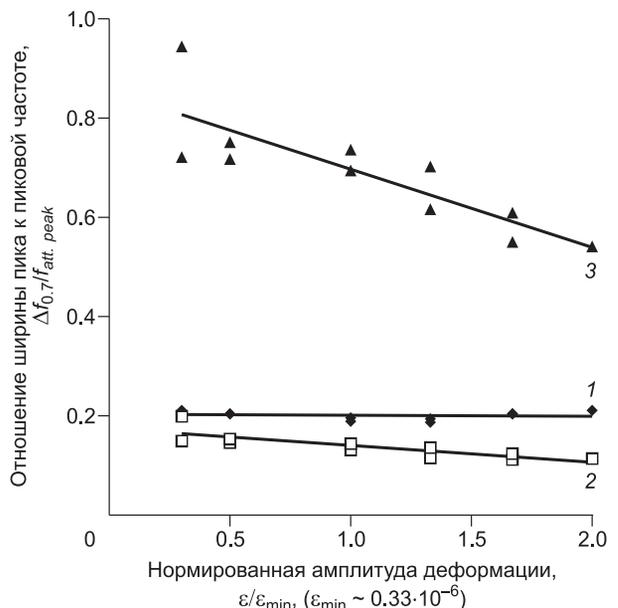
частотные зависимости декремента затухания в сухом и водонасыщенном песчаниках на низко- и высокочастотной стороне релаксационного пика имеют различный характер. В высокочастотной области релаксационные кривые для сухого и водонасыщенного песчаника практически совпадают между собой. Смещение этих кривых за счет изменения амплитуды происходит почти параллельно друг другу. В низкочастотной области релаксационного пика кривые расходятся. Смачивание породы приводит к разрушению релаксационного пика. Здесь смещение кривых под влиянием увеличивающейся амплитуды происходит не последовательно. Намечается тенденция к образованию другого пика в низкочастотной области с большей величиной затухания в пике.

Релаксационные спектры затухания поперечной волны $Q_s^{-1}(f, |\epsilon_{1-6}|_{const})$ в сухом и водонасыщенном песчанике представлены на рис. 3. Кривые имеют форму пика затухания. Введение воды в песчаник приводит к существенному (в четыре раза) увеличению затухания и сдвигу релаксационного пика в сторону высоких частот. Увеличение амплитуды импульса, как и в случае с продольной волной, ведет к уменьшению величины декремента затухания. Помимо этого, в водонасыщенном песчанике уменьшается ширина релаксационного пика, т.е. увеличивается добротность породы. В сухом песчанике изменений в ширине пика не наблюдается.

Наиболее значительным результатом данного исследования является эффект изменения ширины релаксационного пика затухания S -волны под действием изменяющейся амплитуды, который обнаружен в водонасыщенном песчанике (рис. 4). На графике показана зависимость отношения ширины пика $\Delta f_{0.7}$ на уровне 0.7 к пиковой частоте $f_{att, peak}$ от величины амплитуды: $[\Delta f_{0.7} / f_{att, peak}] (\epsilon_{1-6})$. С изме-

Рис. 4. Отношение ширины релаксационного пика к пиковой частоте в зависимости от амплитуды импульса S -волны в сухом и водонасыщенном песчанике.

1 — сухой, 2 — водонасыщенный песчаник, 3 — отношение ширины пика в водонасыщенном состоянии к его ширине в сухом состоянии.



нением амплитуды импульса величина $\Delta f_{0,7} / f_{att.peak}$ в сухом песчанике остается неизменной. Однако в водонасыщенном песчанике величина этого отношения линейно уменьшается с увеличением амплитуды. Это уменьшение составляет 27 % для данного амплитудного диапазона. На этом же рисунке представлен график относительного изменения параметра ширины релаксационного пика для сухого и водонасыщенного песчаников. Относительное изменение ширины пика при сравнении песчаников $(\Delta f_{0,7} / f_{att.peak})_{вн} / (\Delta f_{0,7} / f_{att.peak})_{сух}$ является весьма значительным (около 33 %). Таким образом, можно уверенно утверждать, что параметр ширины релаксационного пика затухания является эффективным критерием для сравнения песчаников по флюидонасыщению. Установленные явления относятся к вышеуказанным амплитудному и частотному диапазонам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании предыдущих [Mashinskii, 2005a, 2006] и настоящего исследований можно сделать определенные выводы о поведении декремента затухания волн сжатия и сдвига при изменении амплитуды импульсного сигнала. Декремент затухания на доминантной частоте подчиняется следующему закону:

$$Q_{P,S}^{-1} \propto k \varepsilon^{-n}, \quad (4)$$

где k — безразмерная величина, а $n \leq 1$, т.е. затухание обратно пропорционально амплитуде. Последняя вычисляется, используя простое эмпирическое выражение на основе затухания с гибридным релаксационно-гистерезисным механизмом [Arzhavitin, 2004; Mashinskii, 2006]. В нашем случае для используемого амплитудного диапазона n изменяется в пределах от 0.003 до 0.045. Это указывает на то, что имеет место относительно невысокая скорость изменения декремента затухания с амплитудой. Это можно видеть по небольшому наклону амплитудных кривых (см. рис. 1). Величина $n = 0.045$ соответствует изменению величины декремента затухания на 8—10 % (при изменении амплитуды импульса от минимума до максимума, т.е. в шесть раз). Однако замечено, что скорость изменения затухания с амплитудой в водонасыщенном песчанике выше, чем в сухом песчанике. Это является в некоторой степени отличительным признаком, который необходимо взять на заметку для дальнейших исследований. Следует обратить внимание на то, что скорость изменения затухания с амплитудой является индивидуальной для каждой породы. Можно привести пример, когда скорость изменения затухания с амплитудой в два раза (16—18 %) превышает вышеуказанную в том же самом амплитудном диапазоне [Mashinskii, 2005a].

Анализ полученных данных показывает, что наибольшее влияние амплитудного фактора на характеристики затухания отмечено для S -волны. Это относится как к эффекту смещения релаксационных спектров в осях координат, так и к изменению ширины релаксационного пика. Эффект сужения—расширения релаксационного пика за счет амплитудной вариации является наиболее перспективным в использовании для решения прикладных задач дифференциации пород по флюидонасыщению. Отличительным признаком водонасыщенного и сухого песчаников является принципиально различная реакция этих песчаников на амплитудную вариацию. Параметр ширины релаксационного пика в водонасыщенном песчанике даже в небольшом амплитудном диапазоне претерпевает значительное изменение, тогда как этот параметр в сухом песчанике в том же самом амплитудном диапазоне остается неизменным. Этот эффект требует дальнейших исследований.

Эффект влияния амплитуды на характеристики релаксационного пика затухания требует теоретического обоснования. Классическая формула описания релаксационного пика представляется в виде [Mavko et al., 1998; Dvorkin et al., 2003]

$$Q^{-1}(\omega) = \Delta \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (5)$$

где ω — круговая частота, $\tau = 1/2f_{att.peak}$ — релаксационное время, Δ — релаксационная сила. Как уже указывалось, наиболее перспективной характеристикой является ширина релаксационного пика. В принципе эффект изменения ширины релаксационного пика для поликристаллов известен, но он обусловлен несколькими причинами, например, изменением температуры. Известно Фуос-Кирквуд выражение [Cordero et al., 2003], которое расширяет формулу (5), используя описание релаксационного процесса не одним временем релаксации τ , а спектром времен релаксации

$$Q^{-1}(\omega, T) = \Delta \frac{1}{(\omega\tau)^\alpha + (\omega\tau)^{-\beta}}, \quad (6)$$

где $\alpha = \beta < 1$. В этом случае параметр α контролирует ширину пика в низкотемпературной области, где $\omega\tau < 1$, а параметр β — в высокотемпературной области. Мы усовершенствовали выражение (6) и переписали его в следующем виде

$$Q^{-1}(\omega, \varepsilon) = \Delta(\varepsilon) \frac{1}{(\omega\tau)^\alpha + (\omega\tau)^{-\beta}}, \quad (7)$$

где ε — изменяемая амплитуда импульса, $\Delta(\varepsilon)$ — амплитудно-зависимая релаксационная сила, α и β — амплитудно-зависимые параметры. Тогда получается, что релаксационная сила $\Delta(\varepsilon)$ отвечает за величину затухания в пике Q_{\max}^{-1} , а параметры α , β контролируют расширение—сужение ширины пика затухания при изменении амплитуды импульса. Здесь изложен принципиальный подход, требующий основательной экспериментальной и теоретической проработки.

Данное исследование показало, что параметр ширины релаксационного пика является наиболее эффективным для различия песчаника по насыщению по сравнению с другими амплитудно-зависимыми параметрами затухания. Этот факт должен быть взят в расчет геофизиками при развитии сейсмических методов поисков и разведки месторождений нефти и газа. Определенные результаты уже достигнуты в этом направлении, и имеются примеры использования релаксационных эффектов в ультразвуковом каротаже. Так, для различия пород-коллекторов и неколекторов предлагается использовать релаксационные спектры затухания Q_p и Q_s [Dvorkin et al., 2003; Mavko, Dvorkin, 2005]. Необходимо дополнить этот подход новыми знаниями по амплитудной зависимости параметров затухания, полученных в этой работе. Это позволит получить новые диагностические индикаторы и повысить эффективность сейсмических методов.

ВЫВОДЫ

При изучении влияния амплитудного фактора на характер затухания акустических волн в песчанике в диапазоне деформаций $\sim 10^{-7}$ — 10^{-6} обнаружены ранее не известные эффекты, указывающие на многообразное поведение параметра затухания. Особенно это относится к параметрам релаксационного спектра затухания. Основные выводы этой работы кратко сведены к следующему.

1. Релаксационные спектры затухания S -волны наиболее информативны о водонасыщении песчаника по сравнению с релаксационными спектрами P -волны.

2. Установлено существенное различие релаксационных спектров затухания сдвиговой волны водонасыщенного и сухого песчаника. Это относится к таким параметрам, как величина релаксационной силы, пиковая частота, ширина релаксационного пика.

3. Ширина релаксационного пика затухания сдвиговой волны водонасыщенного песчаника с увеличением амплитуды импульса уменьшается, в то время как в сухом песчанике остается неизменной.

4. Параметр ширины релаксационного пика затухания сдвиговой волны чувствителен к водонасыщению и в перспективе может быть использован в качестве отличительного признака водонасыщенного и сухого песчаника.

Автор благодарен Г.В. Егорову за конструктивное обсуждение экспериментальных результатов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-05-64709).

ЛИТЕРАТУРА

Адушкин В.В., Костюченко В.Н., Кочерян Г.Г., Павлов Д.В. О нелинейном характере деформации породы при распространении сейсмической волны малой амплитуды // Докл. РАН, 1999, т. 368, № 1, с. 103—107.

Зайцев В.Ю., Матвеев Л.А. Амплитудно-зависимая диссипация в микронеоднородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (5), с. 695—710.

Машинский Э.И. Затухание акустических волн переменной амплитуды в консолидированных породах при гидростатическом давлении // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 1, с. 91—96.

Машинский Э.И. Амплитудно-зависимые эффекты при распространении продольной сейсмической волны в межквaziинном пространстве // Физика Земли, 2007, т. 43, № 8, с. 683—690.

Машинский Э.И., Кокшаров В.З., Нефедкин Ю.А. Амплитудно-зависимые эффекты в диапазоне малых сейсмических деформаций // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (4), с. 615—623.

Arzhavitin V.M. Amplitude dependence of the internal friction in a Pb—62 % Sn alloy // Technical Physics, 2004, v. 49, № 6, p. 707—710.

Cordero F., Paolone A., Cantelli R., Ferretti M. Anelastic relaxation process of polaronic origin in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$: interaction between charge stripes and pinning centers // Phys. Rev., 2003, B 67, p. 1—7.

Dvorkin J., Walls J., Taner T., Derzhi N., Mavko G. Attenuation at patchy saturation // A Model EAGE 65th Conference Exhibition. Stavanger, Norway, 2003, p. 1—4.

Fillinger L., Zaitsev V.Yu., Gusev V., Castagnede B. Nonlinear relaxation absorption/transparency for acoustic wave due to thermoelastic effect // Acustica-Acta Acustica, 2006, v. 92, № 1, p. 24—34

Jackson I., Faul U.H., Fitz Gerald J.D., Tan B.H. Shear wave attenuation and dispersion in melt-bearing olivine polycrystals: 1. Specimen fabrication and mechanical testing // J. Geophys. Res., 2004, v. 109, B06201, p. 1—17.

- Johnson P.A., Zinszner B., Rasolofosoan P.N.J.** Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock // J. Geophys. Res., 1996, v. 101, B5, p. 11553—11564.
- Jones S.M.** Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures // Geophys. J. Int., 1995, v. 123, p. 774—780.
- Mashinskii E.I.** The variants of the strain-amplitude dependence of elastic wave velocities in the rocks under pressure // J. Geophys. Eng., 2004, № 1, p. 295—306.
- Mashinskii E.I.** Experimental study of the amplitude effect on wave velocity and attenuation in consolidated rocks under confining pressure // J. Geophys. Eng., 2005a, № 2, p. 199—212.
- Mashinskii E. I.** Non-linear stress-strain relation in sedimentary rocks and its effect on seismic wave velocity // Geophysica (Finland), 2005b, v. 41, № 1—2, p. 3—17.
- Mashinskii E.I.** Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure // J. Geophys. Eng., 2006, № 3, p. 291—306.
- Mavko G., Dvorkin J.** *P*-wave attenuation in reservoir and non-reservoir rock // EAGE 67th Conference & Exhibition. Madrid, Spain, 2005, p. 1—2.
- Mavko G.M., Mukerji T., Dvorkin J.** Rock physics handbook. Cambridge, Cambridge University press, 1998, 329 p.
- Ostrovsky L.A., Johnson P.A.** Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // La Rivista del Nuovo Cimento, 2001, v. 24, № 7, p. 1—46.
- Stewart R.R., Toksoz M.N., Timur A.** Strain dependent attenuation: observations and a proposed mechanism // J. Geophys. Res., 1983, v. 88, B 1, p. 546—554.
- Taylor S.R., Knight R.J.** Incorporating mechanisms of fluid pressure relaxation into inclusion-based models of elastic wave velocities // Geophysics, 2003, v. 68, № 4, p. 1173—1181.
- Tutuncu A.N., Podio A.L., Sharma M.M.** Strain amplitude and stress dependence of static moduli in sandstones and limestones // Rock mechanics: models and measurements. Challenges from industry / Eds. P. Nelson, S. Laubach. Balkema, Rotterdam, 1994, p. 489—496.
- Tutuncu A.N., Podio A.L., Gregory A.R., Sharma M.M.** Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks. Part I: Effect of frequency and strain amplitude // Geophysics, 1998, v. 63, № 1, p. 184—194.
- Winkler K.W.** Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones // J. Geophys. Res., 1983, v. 88, B 11, p. 9493—9499.
- Winkler K.W.** Dispersion analysis of velocity and attenuation in Berea sandstone // J. Geophys. Res., 1985, v. 90, B 8, p. 6793—6800.
- Winkler K.W., Plona T.J.** Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure // J. Geophys. Res., 1982, v. 87, B 13, p. 10776—10780.
- Winkler K.W., Nur A., Gladwin M.** Friction and seismic attenuation in rock // Nature, 1979, № 274, p. 528—531.
- Zaitsev V.Yu., Nazarov V.E., Talanov V.I.** Experimental study of the self-action of seismoacoustic waves // Acoustic Physics, 1999, v. 45, № 6, p. 720—726.
- Zaitsev V.Yu., Gusev V., Castagnede B.** Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic wave interaction with individual crack // Phys. Rev. Lett., 2003, v. 90, № 7, p. 1—4.
- Zinszner B., Johnson P.A., Rasolofosoan P.N.J.** Influence of change in physical state on elastic nonlinear response in rock: significance of effective pressure and water saturation // J. Geophys. Res., 1997, B 102, p. 8105—8120.

Рекомендована к печати 26 декабря 2008 г.
М.И. Эповым

Поступила в редакцию 16 мая 2008 г.
после доработки — 6 октября 2008 г.