

## 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/см<sup>3</sup>, 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  $\alpha$  — коэффициент поглощения, дБ/м,  $V$  — фазовая скорость, м/с и  $f$  — частота, Гц. Величина  $\alpha$  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  $\rho_r$  и  $\rho_b$  — плотности, кг/м<sup>3</sup>,  $V_r(f)$  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:  $\epsilon_1 = 0.3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\epsilon_2 = 0.5 \cdot 10^{-6}$ ,

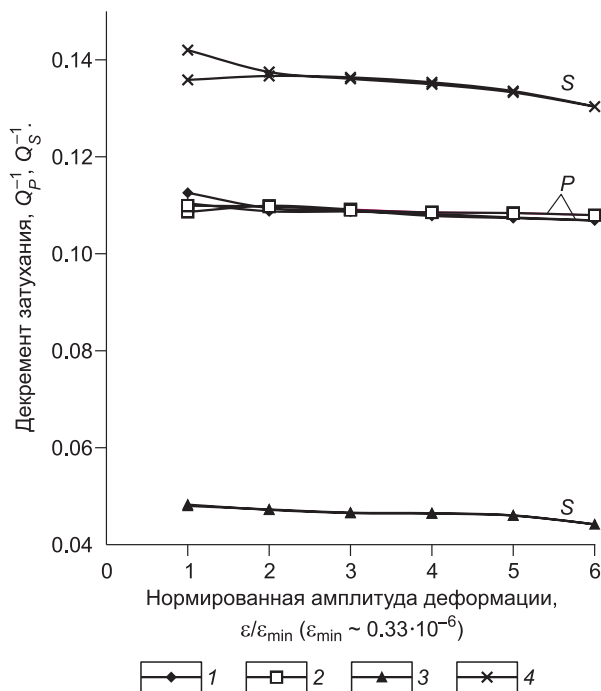
$\varepsilon_3 = 1.0 \cdot 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_4 = 1.3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_5 = 1.7 \cdot 10^{-6}$  и  $\varepsilon_6 = 2 \cdot 10^{-6}$  (т.е. это относительные микродеформации). Таким образом, полный цикл ( $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_6 \rightarrow \varepsilon_1$ ) включал 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,  $\lambda$  — длина волны. Величина  $\varepsilon_{\max}$  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  $\varepsilon$  — текущая деформация,  $\varepsilon_{\min}$  — 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

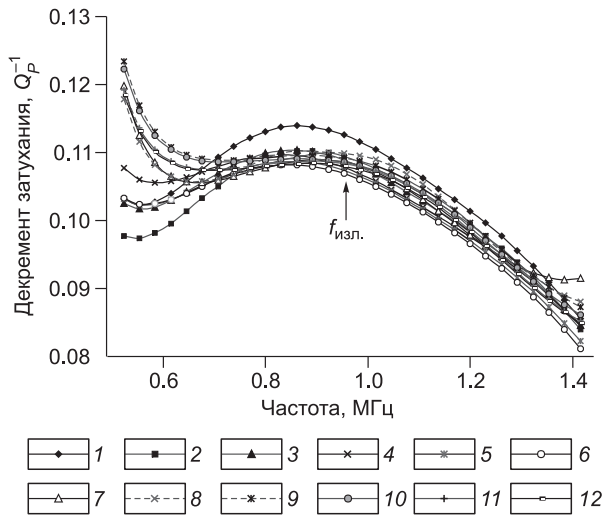
Зависимости декремента затухания продольной и поперечной волн от амплитуды на доминантной частоте представлены на рис. 1. Величина декремента затухания продольной волны как в сухом, так и в



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.

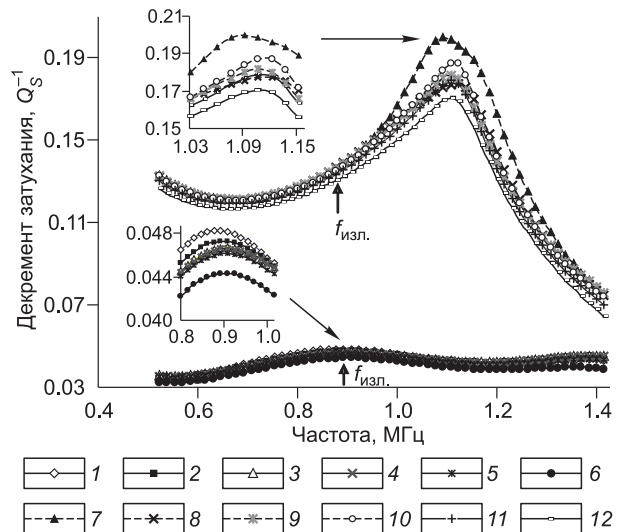
Релаксационные спектры затухания продольной волны  $Q_P^{-1}(f, |\varepsilon_{1-6}|_{\text{const}})$  в сухом и водонасыщенном песчанике представлены на рис. 2. Имеется релаксационный пик затухания. Как видно из графиков,

**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.



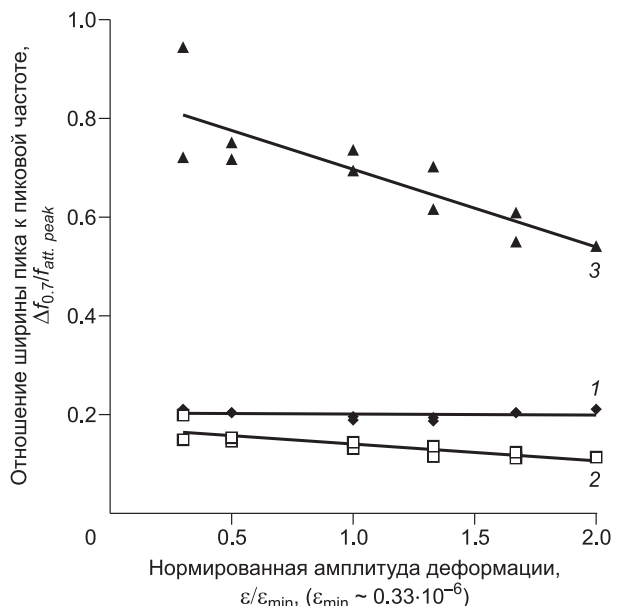
**Рис. 3. Затухание поперечной волны в сухом и водонасыщенном песчанике в зависимости от частоты для шести уровней амплитуды.**

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  $\omega$  — круговая частота,  $\tau = 1/2f_{att.peak}$  — релаксационное время,  $\Delta$  — 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  $\tau$ , 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  $\alpha$  контролирует ширину пика в низкотемпературной области, где  $\omega\tau < 1$ , а параметр  $\beta$  — 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  $\varepsilon$  — изменяемая амплитуда импульса,  $\Delta(\varepsilon)$  — амплитудно-зависимая релаксационная сила,  $\alpha$  и  $\beta$  — амплитудно-зависимые параметры. Тогда получается, что релаксационная сила  $\Delta(\varepsilon)$  отвечает за величину затухания в пике  $Q_{\max}^{-1}$ , а параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  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.*