



ЗАТУХАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ УЗ-ВОЛН В ЧАСТИЧНО И ПОЛНОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСЧАНИКАХ-КОЛЛЕКТОРАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Э.И. Машинский, Н.А. Голиков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru, GolikovNA@ipgg.sbras.ru*

Изучено затухание P - и S -волн в частично и полнонасыщенных песчаниках-коллекторах, находящихся под давлением 24 МПа и при комнатной температуре. Анализ проведен на восьми образцах различных песчаников, в качестве изучаемого параметра использовалось отношение релаксационного спектра затухания продольной волны $Q_p^{-1}(f)$ к спектру поперечной волны $Q_s^{-1}(f)$ в полосе частот 0.25–0.6 МГц. Зависимости $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(f)$ в диапазоне водонасыщения $S_w = 0$ –100 % преимущественно представлены в виде монотонных кривых ($\sim f$ или $1/f$) и реже в виде купола или впадины. Величина отношения Q_p^{-1}/Q_s^{-1} (~ 1 –3) в полностью насыщенных песчаниках всегда ниже, чем в сухих и частично насыщенных (~ 4 –20). Величина отношения P/S -затухания с увеличением насыщения уменьшается. При частичном насыщении ($S_w = 20$ –90 %) в некоторых образцах обнаружены локальные пики отношения P/S -затухания на кривой $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(S_w)$, которые оказывают маскирующее влияние при диагностике флюидонасыщения. Коэффициент Пуассона ν у всех песчаников с увеличением насыщения значительно (до 82 %) возрастает. Установлено, что пики на кривых $Q_p^{-1}(S_w)$ и $Q_s^{-1}(S_w)$ соответствуют локальным пикам коэффициента Пуассона на кривой $\nu(S_w)$. Возможной причиной пиков является аномальное сочетание газожидкостной фракции и литологической неоднородности. Дисперсия затухания приблизительно соответствует модели стандартного неупругого тела. Параметр отношения Q_p^{-1}/Q_s^{-1} может служить дополнительным индикатором флюидонасыщения в песчанике. Результаты могут быть использованы для улучшения методов геологической интерпретации акустических и сейсмических данных.

Неупругость, нелинейное соотношение напряжение–деформация, неупругие сейсмические параметры, релаксационные спектры затухания, отношение спектров затухания

ATTENUATION OF ULTRASONIC P - AND S -WAVES IN FULLY AND PARTIALLY SATURATED SANDSTONES UNDER PRESSURE

E.I. Mashinskii, N.A. Golikov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Acad. Koptuyugapros., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru, GolikovNA@ipgg.sbras.ru*

Attenuation of ultrasonic P - and S -waves in fully and partially saturated sandstones has been studied under a confining pressure of 24 MPa and dry-room temperature. The spectral ratios $(Q_s/Q_p)(f)$ in the bandwidth from 0.25 to 0.6 MHz were plotted for eight sandstone samples over the complete saturation range $S_w = 0$ –100%. Most of the $(Q_s/Q_p)(f)$ curves behave monotonically ($\sim f$ or $1/f$) but some have peaks or inverted U shapes. The Q_p^{-1}/Q_s^{-1} ratio in fully saturated sandstones is always lower than that in the dry or partially saturated sandstones (~ 1 –3 against ~ 4 –20, respectively), and decreases as the samples become wetter. Some partially wet sandstones ($S_w = 20$ –90%) develop local $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(S_w)$ peaks which obscure the saturation-dependent behaviour and impede the diagnostics. In all sandstones, Poisson's ratio (ν) increases (up to 82 %) with increasing water saturation. The peaks on $Q_p^{-1}(S_w)$, $Q_s^{-1}(S_w)$ curves ratio match the local peaks of Poisson's ratio in the $\nu(S_w)$ curves. The attenuation peaks may result from patchy gas and water saturation in lithologically heterogeneous reservoirs. The frequency dependence of attenuation approximately fits the SIS model. The frequency-dependent attenuation ratio is an indicator of gas or water saturation in most of the studied sandstones, while Poisson's ratio can provide an additional check. The reported results can be used to improve geological interpretation of sonic logs and seismic data.

Inelasticity, nonlinear stress-strain relation, inelastic seismic parameters, relaxation spectra, frequency-dependent P -to- S attenuation ratio

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование методов сейсморазведки основано на поиске эффективных индикаторов углеводородов, которые позволяют различать породы-кол-

лекторы нефти и газа и породы, не обладающие свойствами коллекторов. Современные подходы опираются на использование неупругих свойств горных

пород, которые имеют разнообразные физические проявления. Вязкоупругость проявляется в релаксационных характеристиках. В последнее время в акустике и сейсмике рассматриваются такие параметры, как, например, релаксационные спектры затухания (частотная зависимость) продольных и поперечных волн. При использовании спектров затухания этот параметр является не одномерной характеристикой поглощения упругих волн (численное его значение), а многомерной функцией, зависящей от частоты, амплитуды в волне, давления и т. д. Ожидается, что использование упруго-неупругих параметров пород позволит повысить геологическую эффективность акустических и сейсмических методов для решения задач прогнозирования геологического разреза.

В основу теории метода прогнозирования коллекторов положено акусто-сейсмопетрофизическое моделирование с использованием определенной физической модели горных пород, такой как, например, Rock Physics Model [Dvorkin, Nur, 1993; Dvorkin et al., 1999]. При этом волна, распространяющаяся в частично или полностью насыщенном породе, вызывает колебательное течение порового флюида относительно скелета породы. Помимо глобального эффекта Био имеет место локальное течение (squirt flow) или некоторые модификации этих процессов. Во всех случаях в результате такого эффекта происходят колебания порового давления и возникают вязкие потери энергии, которые ответственны за затухание волн и изменение величины продольного и сдвигового модулей в зависимости от частоты (частотная дисперсия) [Mavko, Dvorkin, 2005].

Дисперсия упругого модуля (скорости волны) и затухания Q^{-1} зависит от степени флюидонасыщения породы. В такой вязкоупругой модели дефект модуля определяется величинами низкочастотного (релаксированного) и высокочастотного (нерелаксированного) модулей. Считается, что различие между газосодержащей и смоченной породой определяется различием между релаксированным и нерелаксированным модулями. Так как упругие модули связаны с поглощением через соотношение Крамера-Кронига, дисперсии модулей и затухания Q^{-1} связаны между собой. Характер спектра затухания и дисперсия модуля определяются типом вязкоупругой модели. Наиболее распространенной считается модель стандартного линейного тела (в современной трактовке – стандартного неупругого тела). Она наиболее близко отражает реальные свойства среды и поэтому часто применяется для изучения неупругих свойств горных пород.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В модели стандартного неупругого тела затухание Q^{-1} определяется следующим выражением:

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

где ω – круговая частота; $\tau_r = 1/2\pi f_r$ – релаксационное время (f_r – частота релаксационного максимума, или критическая частота); Δ – релаксационная сила, зависящая от величины упругих модулей в низкочастотном и высокочастотном приближениях [Mavko et al., 1998; Dvorkin et al., 2003]. Релаксационная сила определяет дефект упругого модуля:

$$\Delta_P = \frac{M_u - M_r}{\sqrt{M_r M_u}}, \quad \Delta_S = \frac{G_u - G_r}{\sqrt{G_r G_u}}, \quad (2)$$

где M_r , G_r и M_u , G_u – релаксированный и нерелаксированный упругие модули продольной и поперечной волн соответственно.

Формула (1) описывает классический дебаевский пик. Когда частота распространяющегося сигнала совпадает с частотой релаксационного пика, максимальное затухание описывается следующими выражениями:

$$Q_{P-\max}^{-1} = \frac{M_u - M_r}{2\sqrt{M_r M_u}}, \quad Q_{S-\max}^{-1} = \frac{G_u - G_r}{2\sqrt{G_r G_u}}. \quad (3)$$

Наличие компоненты сжатия в сдвиговой деформации является физической основой существования связи между дисперсией модулей сжатия и сдвига. Поскольку модель включает вязкоупругие элементы, ответственные за частотно зависимое упрочнение (повышение жесткости с увеличением частоты), то они будут вносить вклад в деформацию сдвига. Считается, что механизм затухания в частично-насыщенной породе в сейсмическом диапазоне частот является подобным механизму затухания на ультразвуковых частотах (акустического каротажа). Он обусловлен локальным течением в межпоровом пространстве, где вызванные волной поперечные колебательные движения (перетоки) происходят между его мягкими и жесткими частями [Mavko, Dvorkin, 2005]. Авторы теоретически рассчитали отношение затухания продольной волны Q_P^{-1} к затуханию поперечной волны Q_S^{-1} . При этом принималось во внимание, что уменьшение модуля сжатия смоченной породы между высокочастотным и низкочастотным пределами вызвано введением в среду гипотетической системы ориентированных дефектов (трещин). Вычисление затухания продольных и поперечных волн проводилось с использованием формул (3), где разность между высоко- и низкочастотным модулями вычислялась по теории Хадсона (Hudson) через константы Ламе и плотность трещин. Принималось также, что вышеуказанные модули связаны с коэффициентом Пуассона (скоростями волн) следующим соотношением:

$$\frac{M}{G} = \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu} = \frac{V_P^2}{V_S^2}, \quad (4)$$

где $M = \sqrt{M_r M_u}$, $G = \sqrt{G_r G_u}$, ν – коэффициент Пуассона, V_P и V_S – скорости продольных и поперечных волн.

Получены выражения для отношения затухания продольной волны к затуханию поперечной волны для трех моделей расположения дефектов: с анизотропией, без анизотропии и с произвольно ориентированными дефектами. Для краткости мы приводим выражение для сети произвольно ориентированных изотропных дефектов [Mavko et al., 2005]:

$$\frac{Q_P^{-1}}{Q_S^{-1}} = \frac{1}{M/G} \left[\frac{4}{3} + \frac{5}{4} \frac{(M/G - 2/3)(M/G - 4/3)^2}{M/G - 8/9} \right]. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что в этом уравнении Q_P^{-1} является затуханием в водонасыщенной породе. В теоретических расчетах предполагается, что при существенной неоднородности породы различие между низкочастотным и высокочастотным модулями вносит

заметный рост затухания продольной волны. Это возможно, поскольку продуктивному пласту присуща пятнистость, фрагментарность (patchy) в виде “разношерстных” газожидкостных включений [Cadoret et al., 1995]. В работе [Dvorkin, Nur, 2003] утверждается, что предложенная петрофизическая модель позволяет выделять газогидратные резервуары. В то же время существует и определенная проблема в применении этой теории, так как для повышения ее точности необходимы знания некоторых параметров, например, таких как проницаемость, характеристическая длина (squirt-flow) и пространственные масштабы пор.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Лабораторные импульсные измерения на ультразвуковых частотах с малыми образцами и низкочастотные акустические измерения резонансным методом на больших образцах показали слабую зависимость Q_S^{-1} от водного насыщения. Затухание продольной и поперечной волн при полном водонасыщении является по величине приблизительно тем же самым: $Q_P^{-1} \approx Q_S^{-1}$ [Klimentos, 1995; Sun et al., 2000]. Проведенные измерения в карбонатах в сухом и полнонасыщенном состоянии показывают превышение в величине затухания продольной волны по сравнению с поперечной: $Q_P^{-1} > Q_S^{-1}$ [Adam et al., 2009]. Аналогичный результат получен при измерениях в полно газ- и водонасыщенных песчаниках-коллекторах [Машинский, Голиков, 2011]. Отношение спектров $(Q_P^{-1}/Q_S^{-1})(f)$ в диапазоне частот 0.2–1.0 МГц составляет для полнонасыщенных песчаников ~1–3, а для сухих песчаников – ~3–15.

Лабораторное изучение дисперсии затухания в сухих и водонасыщенных породах при пластовом давлении показало некоторые ранее неизвестные эффекты, связанные с влиянием амплитудного фактора: сдвиг спектров затухания продольных и поперечных волн по осям частот и $1/Q$, изменение ширины релаксационных пиков при изменении интенсивности излучаемого сигнала, остаточный гистерезис параметра затухания [Mashinskii, 2006, 2008]. Для поперечной

волны отношение ширины релаксационного пика к его частоте $\Delta f_{0.7}/f_r$ является амплитудно-зависимым в водонасыщенном песчанике и амплитудно-независимым в сухом песчанике. Относительное изменение ширины пика вода–газ $(\Delta f_{0.7}/f_r)_{\text{вода}}/(\Delta f_{0.7}/f_r)_{\text{газ}}$ при шестикратном изменении амплитуды импульса является весьма значительным (около 40 %) [Машинский, 2009]. Предполагается, что этот параметр может являться дополнительным критерием для дифференциации песчаников по флюидонасыщению.

Изучение новых эффектов направлено на поиск диагностических признаков для решения прикладных задач акустического каротажа, сейсмической разведки и др. [Dvorkin et al., 2003; Mavko, Dvorkin, 2005]. Сложной проблемой является разделение пород-коллекторов и не коллекторов в условиях их естественного залегания. В настоящей статье представлены результаты экспериментов по изучению затухания ультразвуковых продольных и поперечных волн в частично и полно газ- и водонасыщенных песчаниках, находящихся в условиях гидростатического давления 24 МПа и комнатной температуры. Это исследование выполнено для понимания физики дисперсионных механизмов при распространении упругих волн в реальных горных породах.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение характеристик затухания в песчаниках проводилось на установке ССО-60-90, позволяющей моделировать условия, близкие к условиям естественного залегания горных пород (рис. 1, а). Она состоит из механического и электронного блоков. Первый представляет камеру высокого давления, внутри которой размещается исследуемый образец в защитной резиновой манжете, через которую передается боковое давление. Конструктивно идентичные источник и приемник ультразвуковых колебаний состоят из набора пьезокерамических дисков, которые служат для возбуждения и приема продольных и поперечных волн. Излучатель и приемник смонтированы внутри стального корпуса, который одновременно служит пуансоном для создания осевого давления. Общее

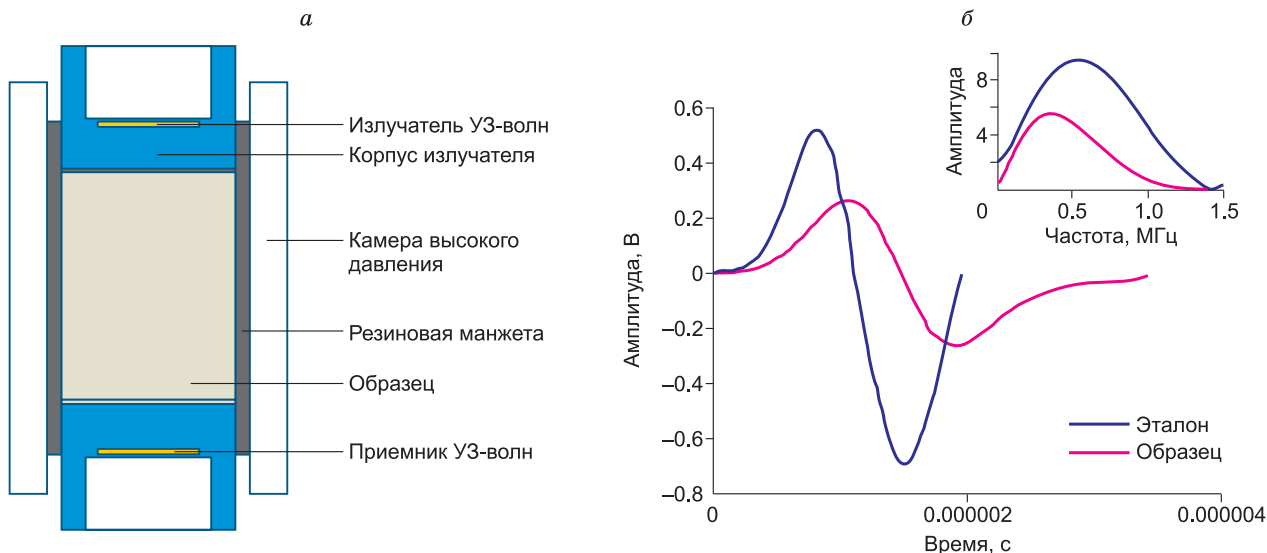


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной установки (а) и импульсы Р-волн, прошедшие через эталон и образец (б).

Во вставке – спектры Фурье этих импульсов.

Характеристики образцов-песчаников

№ п/п	Литологическое описание Песчаник	Пористость Кп, %	Проницаемость Кпр, мД	Водоудерживающая способность Квоц, %	Плотность объемная, г/см ³	Карбонатность Ск, %	Скорости <i>P</i> - и <i>S</i> -волн, м/с			
							Водонасыщенные		Сухие	
							<i>V_P</i>	<i>V_S</i>	<i>V_P</i>	<i>V_S</i>
1	Мелко- и среднезернистый, однородный	19.3	176	28.2	2.12	0	3780	2180	3577	2210
2	Мелкозернистый, с рассеянным углисто-слюдистым материалом, карбонатный	5.9	0.01	79.8	2.5	16.4	5082	2870	4882	2884
3	Мелкозернистый	13.1	2.3	49.9	2.27	3.2	4053	2255	3624	2322
4	Песчаник мелкозернистый, однородный	21.4	15	33.5	2.1	0	3659	2222	3571	2308
5	Среднезернистый, однородный	18.4	81	22.1	2.17	0	3804	2165	3518	2208
6	Мелкозернистый, с прослойками рассеянного углисто-слюдистого материала	13.4	1.7	46.1	2.3	0	3765	2262	3619	2367
7	Песчаник мелкозернистый, однородный с включением УРД	8.9	0.2	67.4	2.43	0	4913	2680	4359	2623
8	Песчаник мелкозернистый, слабокарбонатный	16.4	12	42.7	2.21	10.2	3758	2307	3729	2296

давление на образец является гидростатическим, источником которого служит гидравлическая станция.

Параметры затухания были изучены на проходящих волнах в диапазоне водонасыщения $S_w = 0-100\%$. Измерительный блок включает генератор возбуждающих импульсов, цифровой осциллограф С9-8 и РС для регистрации и хранения записей. Последний содержит два синхронных восьмиразрядных АЦП с частотой дискретизации 50 нс и длиной 1024 точки, диапазон входных сигналов – до 5 В. Измерения скоростей волн и коэффициентов затухания проводились методом сравнения с эталоном, в качестве которого использовался одинакового геометрического размера образец из дюралюминия.

Для исследования была отобрана коллекция из восьми образцов песчаников-коллекторов нефти и газа месторождений Западной Сибири. Предварительно на образцах были измерены фильтрационно-емкостные свойства. К ним относятся коэффициент пористости, коэффициент проницаемости, водоудерживающая способность, карбонатность. Измерения были выполнены при полном водонасыщении образцов, в высушенном состоянии и в частично газоводонаполненном. Полное насыщение ($S_w = 100\%$) порового пространства образцов осуществлялось раствором NaCl с плотностью 30 г/дм³, соответствующей минерализации пластовых вод. Приведение к сухому состоянию осуществлялось путем отгонки жидкости на центрифуге и высушивания образцов при температуре 105 °С. После этого выполнялись измерения в условиях абсолютно сухого состояния и комнатной влажности. Характеристики образцов представлены в табл. 1.

Затухание продольных и поперечных волн вычислялось с помощью следующего соотношения [Winkler, 1983]:

$$Q^{-1} = \frac{V}{\pi f L} \ln \left(\frac{A_{\text{эт}}(f)}{A_{\text{обр}}(f)} \right), \quad (6)$$

где, V – фазовая скорость, м/с⁻¹; f – частота, Гц; L – длина образца, м; $A_{\text{обр}}(f)$ – амплитуда Фурье импульса,

прошедшего через образец; $A_{\text{эт}}(f)$ – амплитуда Фурье импульса, прошедшего через эталон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено восемь типов песчаников-коллекторов (см. табл. 1). На рис. 1, б показаны для примера импульсы продольной волны, прошедшие через образец и эталон, и их спектры Фурье. Импульсы имеют простую форму с преобладающими частотами 0.53 и 0.37 МГц для *P*-волны и 0.39 и 0.29 МГц для *S*-волны соответственно.

Отношение величины затухания продольной волны к величине затухания поперечной Q_P^{-1}/Q_S^{-1} является численной характеристикой газо- и водонасыщенной породы. Мы использовали дисперсионное отношение, т. е. отношение релаксационных спектров затухания продольных и поперечных волн в определенном диапазоне частот: $Q_P^{-1}(f)/Q_S^{-1}(f) = R(f)$. Ранее такой подход был применен при изучении абсолютно сухих и полноводонасыщенных песчаников [Машинский, Голиков, 2011]. Релаксационные спектры (в дальнейшем – спектры затухания) были получены в частотной полосе 0.2–0.6 МГц путем вычисления величины затухания для отдельных спектральных компонент по формуле (6). Отличительной особенностью представленных здесь экспериментов является получение зависимости $R(f)$ во всем диапазоне газо- и водонасыщения $S_w = 0-100\%$. Образец является полностью сухим (газонасыщенным), когда $S_w = 0$, и полностью водонасыщенным при $S_w = 100\%$. Образцы с промежуточным насыщением являются частично флюидонасыщенными.

Качественное поведение отношения *P/S*-затухания является разнообразным. В основном, зависимость $R(f)$ имеет вид спадающих монотонных кривых, т. е. величина Q_P^{-1}/Q_S^{-1} с увеличением S_w падает. В качестве примера на рис. 2 показаны зависимости $R(f)$ для песчаника № 7. Форма кривой $R(f)$ может быть также линейной, в виде впадины или купола, как, например, у песчаников № 5 и 6 (рис. 3, 4).

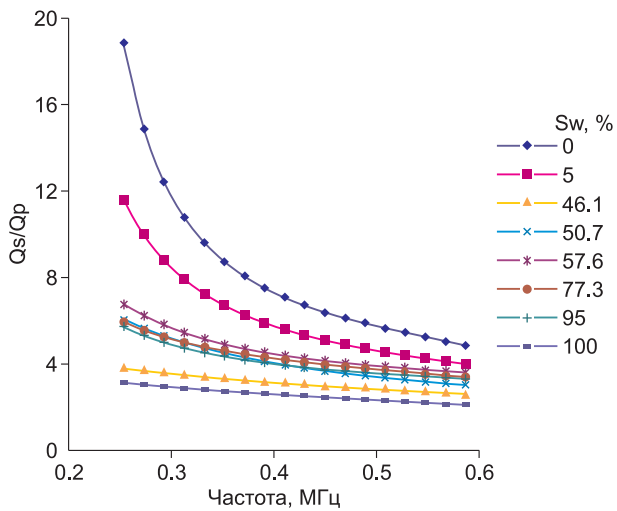


Рис. 2. Отношение спектра затухания продольной волны к спектру затухания поперечной волны при различных величинах водонасыщения для песчаника № 7.

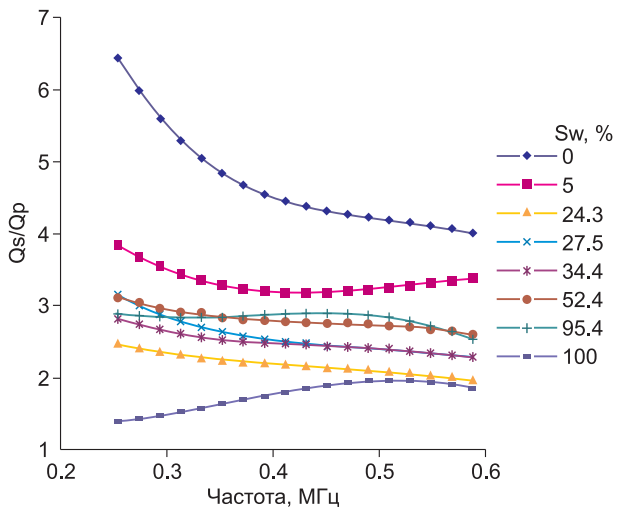


Рис. 3. Отношение спектра затухания продольной волны к спектру затухания поперечной волны при различных величинах водонасыщения для песчаника № 5.

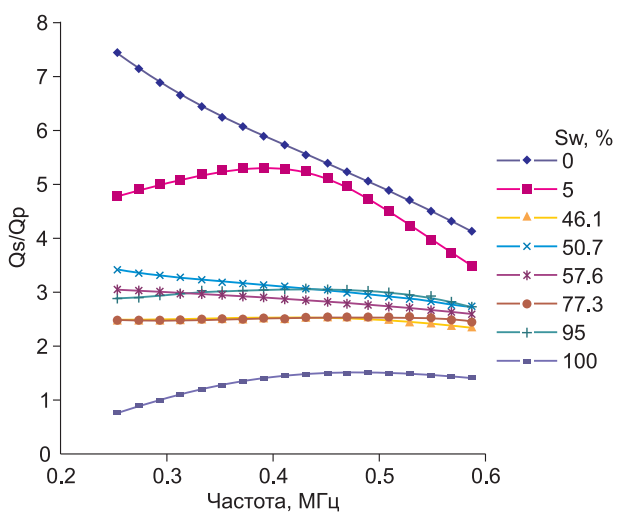


Рис. 4. Отношение спектра затухания продольной волны к спектру затухания поперечной волны при различных величинах водонасыщения для песчаника № 6.

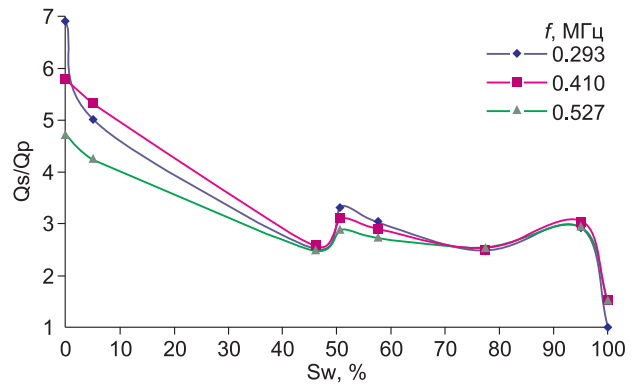


Рис. 5. Отношение затухания продольной волны к затуханию поперечной волны трех частотных компонент в зависимости от степени водонасыщения у песчаника № 6.

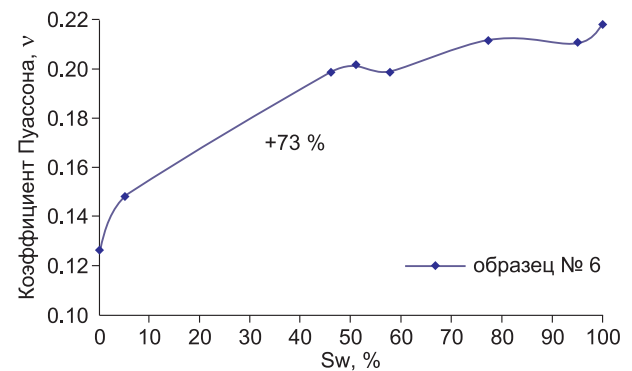


Рис. 6. Зависимость коэффициента Пуассона от степени водонасыщения для песчаника № 6.

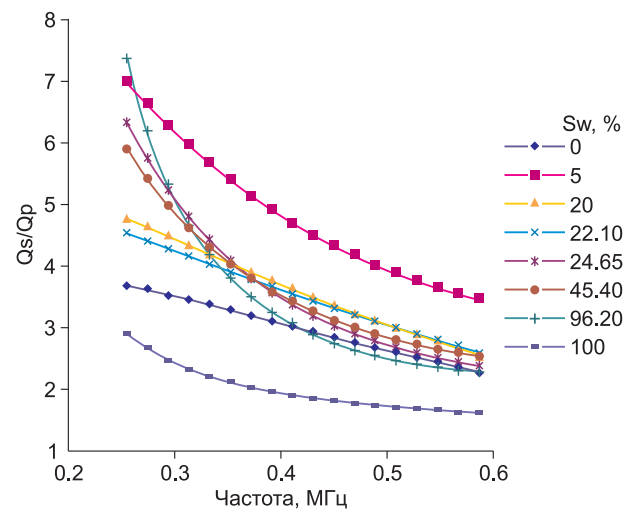


Рис. 7. Отношение спектра затухания продольной волны к спектру затухания поперечной волны при различных величинах водонасыщения для песчаника № 1.

Величина Q_p^{-1}/Q_s^{-1} изменяется во всем диапазоне S_w значительно. Можно выделить малые, большие и промежуточные значения этого отношения. Минимальная величина Q_p^{-1}/Q_s^{-1} , как правило, соответствует полному (100 %) или близкому к нему водонасыщению: $Q_{p-S_w=100}^{-1}/Q_{s-S_w=100}^{-1} \approx (1-3)$. Максимальная величина отношения (до 20) указывает на сухое ($S_w = 0$) или слегка смоченное состояние ($S_w = 5$ %). При частичном газоводонасыщении величина Q_p^{-1}/Q_s^{-1} в основном имеет промежуточные значения, хотя есть некоторые исключения, о которых речь пойдет ниже. Следует отметить, что полученный нами факт малой величины отношения Q_p^{-1}/Q_s^{-1} для полноводонасыщенного состояния по сравнению с сухим состоянием подтверждается некоторыми данными [Klimentos, 1995; Sun et al., 2000]. Однако имеется расхождение в самих величинах. Полученное в других работах $Q_{p-S_w=100}^{-1}/Q_{s-S_w=100}^{-1} \approx 1$, а в наших измерениях оно расширено до $\sim 1-3$ в зависимости от типа песчаника.

Изменение величины Q_p^{-1}/Q_s^{-1} в диапазоне $S_w = 0-100$ % для песчаника № 6 показано на рис. 5. Здесь представлены три кривые для трех частотных компонент. При полном водонасыщении величина Q_p^{-1}/Q_s^{-1} близка к 1, а при полном газонасыщении эта величина составляет $\sim 5-7$.

Различие между абсолютно сухим и полноводонасыщенным состоянием можно видеть также по величине коэффициента Пуассона ν . На рис. 6 представлен график зависимости ν от степени водонасыщения $\nu(S_w)$ для песчаника № 6. Величина ν с увеличением водонасыщения значительно (на 73 %) возрастает. Возрастание ν во всем диапазоне насыщения для всех песчаников составляет от 30 до 82 %, т. е. различие между сухим и полноводонасыщенным песчаником по этому показателю является довольно большим.

Таким образом, для большинства изученных песчаников отношение дисперсионного затухания $R(f)$ может служить индикатором газонаполненного и водонаполненного состояний. Коэффициент Пуассона может быть использован как дополнительный признак.

В то же время имеются некоторые факторы, которые могут усложнять диагностику флюидонасыщения: низкие концентрации воды в сухом песчанике и малые концентрации газа в водонасыщенном песчанике. В этих случаях наибольшая величина Q_p^{-1}/Q_s^{-1} может характеризовать не абсолютно сухой песчаник, а с 5 % водонасыщением. Аналогично этому наименьшая величина Q_p^{-1}/Q_s^{-1} характеризует песчаник не со 100 % насыщением, а с малым содержанием газа (до 5 %). Аномалии Q_p^{-1}/Q_s^{-1} при промежуточном насыщении иногда маскируют контраст состояния газ-вода и вносят неоднозначность в оценку степени насыщения по кривой $R(f)$. Возможно, здесь вступает в действие так называемый ложный индикатор, который связан с наличием флюида в виде шипучей воды (fizz water) [Han, Batzle, 2002]. Эффект шипучей воды еще недостаточно понят и оценен. Считается только, что газ, растворенный в воде, слабо влияет на скорости волн. Эффект экранирования флюидной смеси обнаружен в песчаниках № 1 и 8. Для примера на рис. 7 представлены графики $R(f)$ для песчаника № 1. Флюидная смесь в диапазоне $S_w = 20-96.2$ % экранирует кривую $S_w = 0$, а в качестве “контрастного агента” с наибольшей величиной отношения Q_p^{-1}/Q_s^{-1} выступает кривая $S_w = 5$ %.

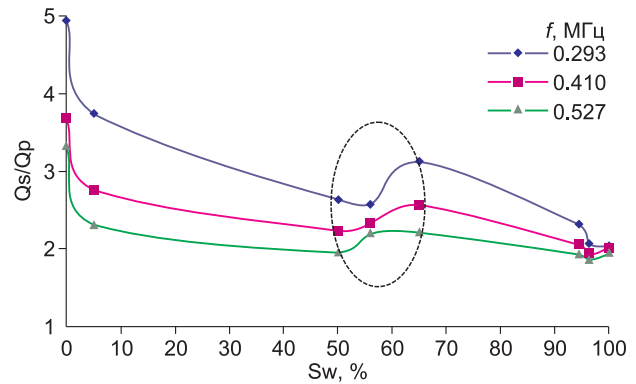


Рис. 8. Отношение затухания продольной волны к затуханию поперечной волны трех частотных компонент в зависимости от степени водонасыщения у песчаника № 3.

В диапазоне промежуточного насыщения возможны аномалии на кривых $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(S_w)$, которые могут быть обусловлены как эффектами флюидной смеси, так и литологическими неоднородностями patchy-типа. На рис. 8 для примера представлены такие графики $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(S_w)$ образца № 3 для трех частотных компонент. Аномалия расположена в районе $S_w = 56$ %. Она связана с аномалией коэффициента Пуассона. На рис. 9 приведены зависимости затухания продольных и поперечных волн и коэффициента Пуассона от степени водонасыщения. Пик на зависимости $\nu(S_w)$ совпадает с пиками затухания на кривых $Q_p^{-1}(S_w)$ и $Q_s^{-1}(S_w)$ для частотной компоненты 0.41 МГц. Все пики расположены в одной и той же области $S_w = 56$ %. Причиной такого поведения коэффициента Пуассона является аномальная величина отношения V_S/V_P в этой области S_w .

Проведено вычисление отношений Q_p^{-1}/Q_s^{-1} по формуле (5) с использованием скоростей V_P и V_S для восьми типов песчаников из наших экспериментов и получена зависимость этих отношений от величины ν . Сделано сравнение этой зависимости с кривой $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}(\nu)$, взятой из работы [Mavko, Dvorkin, 2005; Mavko et al., 2005]. На эти графики наложены реальные величины отношения Q_p^{-1}/Q_s^{-1} , полученные в эксперименте для $S_w = 93-100$ %. Результаты представле-

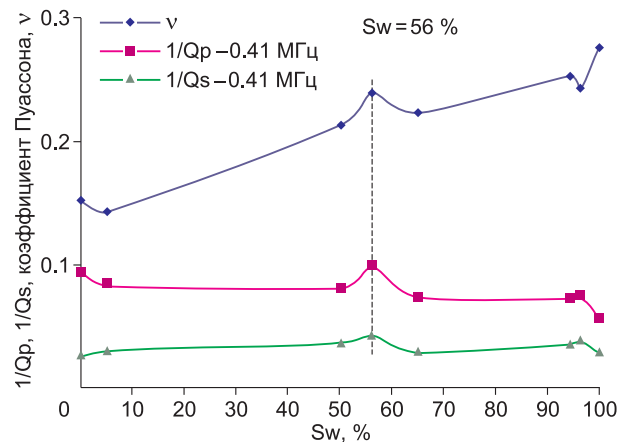


Рис. 9. Затухание продольной и поперечной волн на частоте 0.41 МГц, коэффициент Пуассона в зависимости от степени водонасыщения образца № 3.

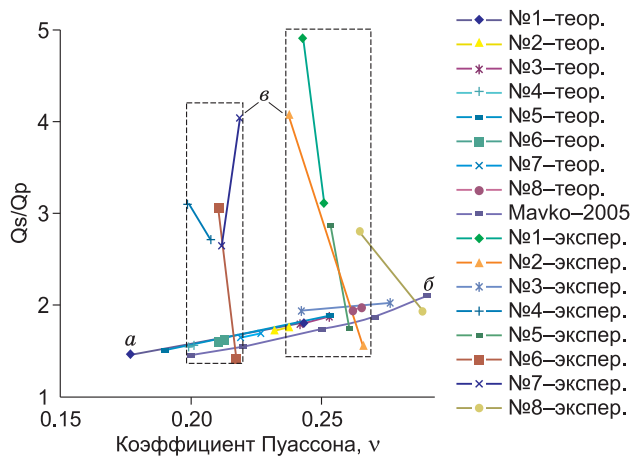


Рис. 10. Отношение затухания продольной волны к затуханию поперечной волны в зависимости от коэффициента Пуассона:

a – вычисление по формуле (5) с использованием экспериментальных значений скоростей волн; *б* – кривая $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(\nu)$, взятая из работы [Mavko et al., 2005]; *в* – наши экспериментальные данные.

ны на рис. 10. Рассчитанная кривая с использованием реальных скоростей хорошо совпадает с теоретической кривой. Все экспериментальные точки укладываются в тот же интервал $Q_p^{-1}/Q_s^{-1} = 1.2-2.2$ в интервале Пуассона 0.21–0.29. В противоположность этому реально измеренные величины отношения Q_p^{-1}/Q_s^{-1} намного превышают значения, полученные теоретическим путем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований влияния степени газонасыщения на затухание продольных и поперечных волн ультразвукового диапазона частот (0.25–0.6 МГц) в различных песчаниках при гидростатическом давлении 24 МПа сделаны следующие выводы.

1. Отношение спектров затухания продольных и поперечных волн $(Q_p^{-1}/Q_s^{-1})(f)$ в большинстве случаев может использоваться для различия полностью сухих (большая величина отношения) и полностью насыщенных песчаников (малая величина).

2. Частичное насыщение в некоторых случаях оказывает маскирующее влияние на диагностику полного или водонасыщенного состояния.

3. Коэффициент Пуассона для всех изученных песчаников возрастает с увеличением насыщения. Зависимость $\nu(S_w)$ может использоваться как дополнительная характеристика для анализа экранирующего влияния при частичном насыщении.

4. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими показывает необходимость совершен-

ствования теории затухания волн в флюидонасыщенных средах с учетом экранирующего эффекта при частичном водонасыщении.

Литература

Машинский Э.И. Амплитудно-зависимое затухание продольных и поперечных волн в сухом и насыщенном песчанике под давлением // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 8. С. 950–956.

Машинский Э.И., Голиков Н.А. Влияние водонасыщения на релаксационные спектры затухания акустических волн в горных породах // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 66–71.

Adam L., Batzle M., Lewallen K.T., van Wijk K. Seismic wave attenuation in carbonates // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. B06208.

Cadoret T., Marion D., Zinszner B. Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 9789–9803.

Dvorkin J., Nur A. Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms // Geophysics. 1993. V. 58. P. 524–533.

Dvorkin J., Nur A. Rock Physics of gas hydrate reservoir // A model EAGE 65th Conference & Exhibition. Stavanger, Norway, 2–5 June. 2003.

Dvorkin J., Prasad M., Sakai A., Lavoie D. Elasticity of marine sediments // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 1781–1784.

Dvorkin J., Walls J., Taner T., Derzhi N., Mavko G. Attenuation at patchy saturation // A Model EAGE 65th Conference & Exhibition. Stavanger, Norway, 2–5 June. 2003.

Han D., Batzle M. “Fizz water” and low gas saturated reservoirs // The Leading Edge. 2002. V. 21, N 4. P. 395–398.

Klimentos T. Attenuation *P*- and *S*-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water // Geophysics. 1995. V. 60. P. 447–458.

Mavko G.M., Mukerji T., Dvorkin J. Rock Physics Handbook. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998. 329 p.

Mavko G., Dvorkin J. *P*-wave attenuation in reservoir and non-reservoir rock EAGE 67th Conference & Exhibition. Madrid, Spain, 13–16 June. 2005.

Mavko G., Dvorkin J., Walls J. A theoretical estimate of *S*-wave attenuation in sediment // SEG Expanded Abstracts. 2005. V. 24. P. 1469–1472.

Mashinskii E.I. Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure // J. Geophys. Eng. 2006. V. 3. P. 291–306.

Mashinskii E.I. Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. B11304.

Sun X., Tang X., Cheng C.H., Frazer L.N. *P*- and *S*-wave logs from monopole sonic data // Geophysics. 2000. V. 65. P. 755–765.

Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, N. 11. P. 9493–9499.

Поступила в редакцию 21 октября 2012 г.,
в окончательном варианте – 10 декабря 2012 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАШИНСКИЙ Эдуард Иннокентьевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Тел. служ.: (383) 333-53-75; дом.: 221-26-47. E-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

ГОЛИКОВ Никита Александрович – ведущий инженер лаборатории экспериментальной сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Тел. служ.: (383) 363-80-31; моб.: 8-913-932-57-14. E-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru