



## ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СПЕКТРЫ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Э.И. Машинский, Н.А. Голиков

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

Изучено влияние водонасыщения на релаксационные спектры затухания (РСЗ)  $P$ - и  $S$ -волн в песчаниках при гидростатическом давлении 24 МПа и комнатной температуре. Эксперименты выполнены на образцах в проходящих волнах с преобладающей частотой импульса (0,4–0,6) МГц. Декремент затухания (инверсная добротность) продольных и поперечных волн нелинейно зависит от частоты. Релаксационные спектры затухания  $P$ -волны сухих и водонасыщенных песчаников преимущественно представлены в виде зависимости  $Q_p^{-1} \sim f$  или  $1/f$  и реже как релаксационный пик, а РСЗ  $S$ -волны всех сухих и водонасыщенных песчаников имеют вид релаксационных пиков. Величина  $Q_p^{-1}$  водонасыщенных песчаников ниже, чем сухих;  $Q_s^{-1}$  песчаников первой группы с введением водонасыщения уменьшается, а песчаников второй группы, наоборот, увеличивается. Параметр  $Q_p^{-1} / Q_s^{-1}$  у всех песчаников при водонасыщении уменьшается и может служить отличительным индикатором. Обнаружено смещение частоты релаксационного пика при смене сухого состояния на водонасыщенное. Дисперсия модуля приблизительно соответствует модели стандартного линейного тела. Характер частотно-зависимого затухания можно объяснить 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 затухания*

### INFLUENCE OF FLUID SATURATION ON RELAXATION SPECTRA OF $P$ -, $S$ -WAVES ATTENUATION IN ROCKS

E.I. Mashinskii, N.A. Golikov

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

Relaxation spectra of  $P$ -,  $S$ -wave attenuation (RSA) in the dry and water-saturated sandstones under confining pressure of 24 MPa and room condition are studied. The experiments on the rock samples during pulse propagation in the (0,4–0,6) MHz range on the unvariable amplitude are performed.  $P$ - and  $S$ -wave attenuation depends nonlinearly on frequency.  $P$ -wave RSA in the dry and saturated sandstones is mainly presented in the form of the curve  $Q_p^{-1} \sim f$  or  $1/f$ , relaxation peak is possible too.  $S$ -wave RSA in the dry and saturated sandstones are presented in the form of the relaxation peaks. The  $Q_p^{-1}$  value in the saturated sandstone is less than in the dry. With saturation, the  $Q_s^{-1}$  value decreases in some sandstones, whereas in other sandstones it increases.  $P$ -to- $S$  RSA relation decreases with saturation always, it is the indicator of the difference between dry and wet condition. The displacement in the frequency of the relaxation peak during transition from dry to the water-saturated is detected. Modulus dispersion approximately corresponds to the standard linear solid model. Character of the frequency-dependent attenuation can be explained by the joint action of viscoelastic and microplastic mechanisms. These results can be used for improving methods of geological interpretation of acoustic and seismic data.

*Inelasticity, nonlinear stress-strain relation, inelastic seismic parameters, relaxation spectra of wave attenuation*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время совершенствование физических основ сейсмологии базируется на поиске эффективных индикаторов углеводородов, позволяющих дистанционными методами диагностировать коллекторы нефти и газа. Развиваемые в этом направлении подходы опираются на использование неупругих свойств горных пород, имеющих разнообразные физические проявления. К таким индикаторам можно отнести, например, релаксационные спектры затухания (частотная зависимость затухания) продольных и попереч-

ных волн. Ожидается, что использование упруго-неупругих параметров пород позволит повысить геологическую эффективность акустических и сейсмических методов для решения задач прогнозирования геологического разреза.

Основной теории метода прогнозирования коллекторов является акустопетрофизическое моделирование с использованием определенной модели физики горных пород, например, Rock Physics Model [1, 2]. Согласно этой модели, распространяющаяся в

частично или полнонасыщенной породе волна вызывает колебательное течение порового флюида относительно скелета породы. Это может быть глобальный эффект Био, локальное течение (squirt flow) или их комбинация. В любом случае вязкие потери в результате этого течения и колебаний порового давления являются ответственными за волновое затухание и изменение величины упругого модуля в зависимости от частоты колебания в волне (частотная дисперсия) [3].

Частотная дисперсия упругого модуля (скорости волны) и декремента затухания (инверсной добротности) может указывать на величину и степень насыщения породы. В такой модели дефект модуля определяется величинами низкочастотного (релаксированного) и высокочастотного (нерелаксированного) модулей, или иначе модулями низкочастотного и высокочастотного предела. Считается, что различие между “пустой” и насыщенной породой определяется различием между релаксированным и нерелаксированным модулями. Как известно, дисперсия упругого модуля связана с поглощением через соотношение Крамерса–Кронига. Характер релаксационного спектра затухания (РСЗ) и дисперсия упругого модуля определяются типом выбранной вязкоупругой модели. В настоящее время большинство исследователей считают, что модель стандартного линейного тела (СЛТ) наиболее близко отражает реальные свойства среды и поэтому часто применяется для изучения неупругих свойств горных пород. В этой модели затухание определяется следующим выражением [4]:

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

где  $\omega$  – круговая частота;  $\tau_r = 1/2\pi f_{\text{пик}}$  – релаксационное время ( $f_{\text{пик}}$  – частота релаксационного максимума, или критическая частота);  $\Delta$  – релаксационная сила, зависящая от величины упругих модулей в низкочастотном и высокочастотном приближении. 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 волны соответственно.

Формула (1) в общем случае описывает классический дебаевский пик. В том случае, когда частота распространяющегося сигнала совпадает с частотой релаксационного пика (критической частотой, определяемой временем релаксации), мы получаем максимальное затухание в пике:

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

Теоретические оценки затухания для смоченной породы показали независимость затухания  $S$ -волны от порового флюида [5]. В используемых расчетах делается также предположение, что низкочастотный модуль сжатия представляет модуль сухой породы, а высокочастотный модуль определяет модуль насыщенной породы. Различие между этими модулями может дать заметный рост затухания продольной волны при условии, что неоднородность породы является существенной. Последнее обстоятельство вполне реально, поскольку продуктивному пласту присуща пят-

нистость, фрагментарность (patchy) в виде “разношерстных” газожидкостных включений [6].

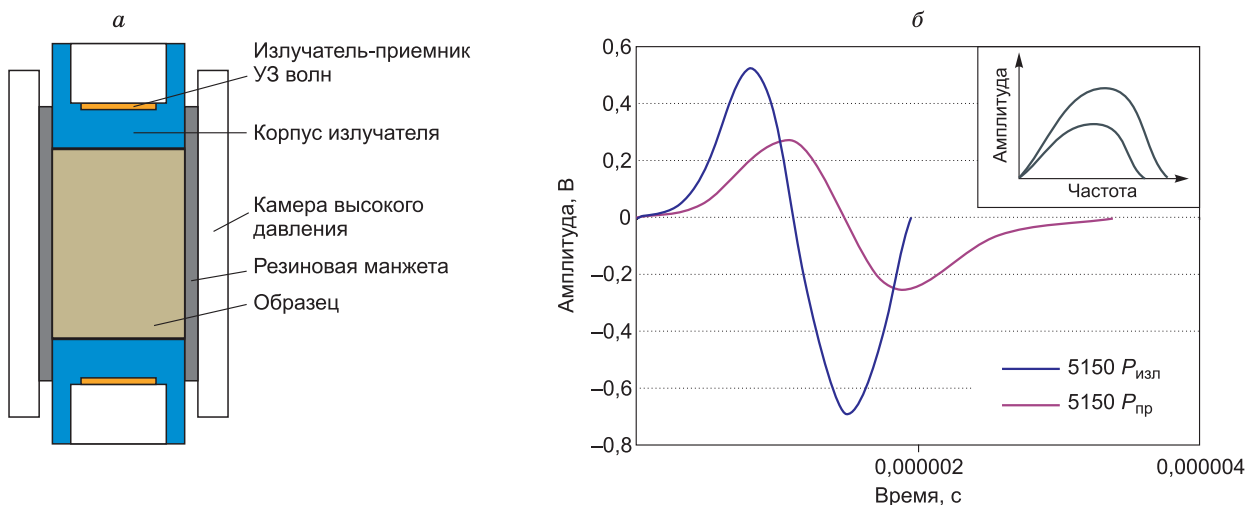
Лабораторные измерения, выполненные на ультразвуковых частотах импульсным методом с малыми образцами и на низких акустических частотах резонансным методом на больших образцах, показали слабую зависимость затухания  $S$ -волны  $Q_S^{-1}$  от водного насыщения. Затухание продольной волны при полном водонасыщении и затухание поперечной волны являются по величине приблизительно тем же самым:  $Q_P^{-1} \approx Q_S^{-1}$  [7, 8]. Имеются также результаты измерений в карбонатах в сухом и полнонасыщенном состоянии, которые указывают на превышение затухания продольной волны над затуханием поперечной волны  $Q_P^{-1} > Q_S^{-1}$  [9].

Лабораторное изучение РСЗ в переменном амплитудно-частотном пространстве в условиях пластового давления показало некоторые возможности использования этого параметра для диагностики флюидонасыщенных пород. Обнаружены ранее неизвестные эффекты, связанные с влиянием амплитудного фактора на некоторые параметры РСЗ. Это сдвиг РСЗ продольных и поперечных волн по осям частот и инверсной добротности, изменение ширины релаксационных пиков при изменении интенсивности излучаемого сигнала, остаточный гистерезис параметра затухания [10–12]. Наиболее перспективным параметром РСЗ для дифференциации породы по флюидонасыщению оказалось отношение ширины релаксационного пика к его частоте  $\Delta f_{0,7}/f_{\text{пик}}$ . Это отношение является амплитудно-зависимым в водонасыщенном и амплитудно-независимым в сухом песчанике. Относительное изменение ширины пика водонасыщенного и сухого песчаника  $(\Delta f_{0,7}/f_{\text{пик}})_{\text{нас}}/(\Delta f_{0,7}/f_{\text{пик}})_{\text{сух}}$  при шестикратном изменении амплитуды импульса весьма значительное (около 40 %). Параметр ширины пика РСЗ может быть дополнительным критерием для дифференциации песчаников по флюидонасыщению.

При дальнейшем изучении этих и других эффектов могут быть получены новые диагностические признаки для решения прикладных задач акустического каротажа, сейсмической разведки и др. [3, 4]. Приведены результаты экспериментов по изучению релаксационных спектров затухания импульсного сигнала в различных песчаниках, находящихся в сухом и водонасыщенном состоянии в условиях гидростатического давления 24 МПа и комнатной температуры. Это исследование представляет большой интерес для понимания физики дисперсионных механизмов в горных породах.

#### МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение акустических характеристик песчаников проводилось на установке ССО-60-90, позволяющей моделировать условия, близкие к условиям естественного залегания горных пород (рис. 1, а). Основу установки составляет камера высокого давления, внутри которой находится резиновая манжета с исследуемым образцом. Боковое давление на образец передается через манжету. Источник и приемник ультразвуковых колебаний имеют одинаковую конструкцию. Они представляют собой набор пьезокерамических дисков для возбуждения и приема продольных и поперечных волн. Приемник и излучатель смонтированы внутри стального корпуса, который одновременно служит пуансоном для создания осевого давле-



**Рис. 1.** Схематическое изображение измерительной установки (а) и излученный и прошедший через образец импульс Р-волны (б).

Во вставке – спектры Фурье этих импульсов.

ния на образец. Общее давление на образец гидростатическое, источник давления – гидравлическая станция.

Исследование упруго-неупругих параметров проводилось в проходящих волнах. Измерительная часть состоит из генератора возбуждающих импульсов и цифрового осциллографа С9-8, соединенного с ПЭВМ, что позволяет регистрировать и хранить сигнал с приемника ультразвуковых колебаний. Осциллограф содержит два синхронных 8-разрядных АЦП с частотой дискретизации 50 нс и длиной 1024 точки, диапазон входных сигналов – до 5 В. Измерения скоростей волн и коэффициентов затухания выполнялись методом сравнения с эталоном, в качестве которого использовался образец из дюралюминия одинакового геометрического размера с образцом.

Для исследований была отобрана коллекция образцов коллекторов нефти и газа месторождений Западной Сибири. Предварительно на образцах измерялись фильтрационно-емкостные свойства, а именно: коэффициент пористости, коэффициент проницаемости, водоудерживающая способность, карбонатность. Измерения проводились при полном водонасыщении образцов и в высушенном состоянии. Полное насыщение порового пространства образцов осуществлялось раствором NaCl с плотностью 30 г/дм<sup>3</sup>, соответствующей минерализации пластовых

вод. После проведения акустических измерений в режиме 100%-го насыщения раствор из образцов отгонялся на центрифуге со скоростью вращения до 5000 оборотов в минуту. Высушивание образца осуществлялось при температуре 105 °С, и затем выполнялись измерения на абсолютно сухом образце и при комнатной влажности. Характеристики образцов представлены в таблице.

Декремент затухания (инверсная добротность) вычислялся, используя соотношение [13]

$$Q^{-1} = \alpha V / 8,686\pi f = \alpha \lambda / 8,686\pi, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения, дБ·м<sup>-1</sup>;  $V$  – фазовая скорость, м·с<sup>-1</sup>;  $f$  – частота, Гц. Величина  $\alpha$  вычисляется, используя соотношение

$$\alpha(\omega) = \frac{8,686}{L} \ln \left( \frac{A_{изл}}{A_{пр}} \right), \quad (5)$$

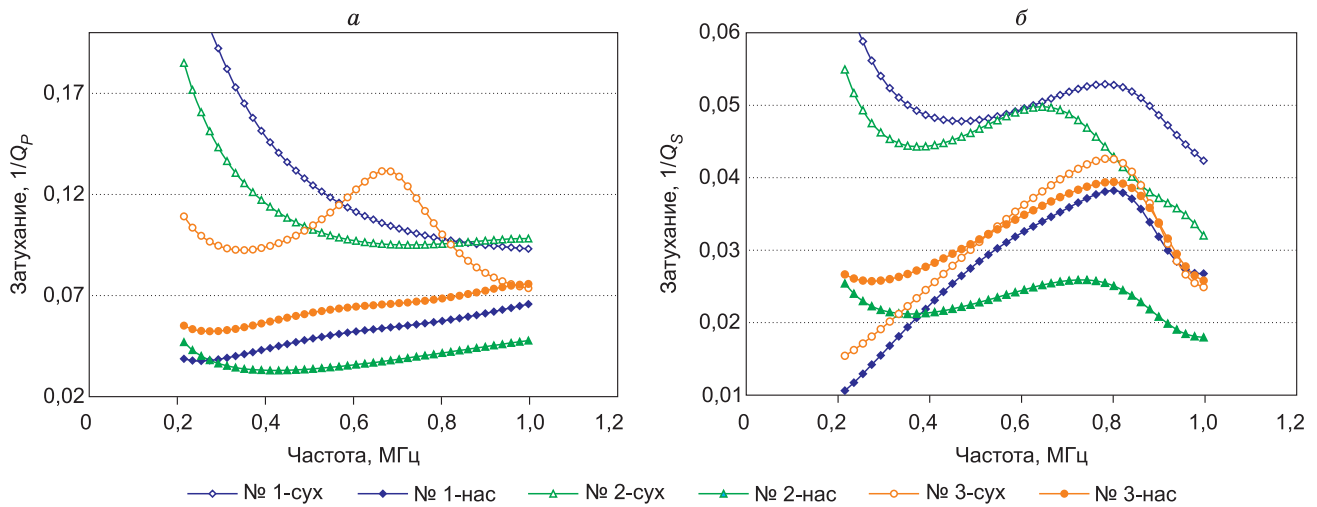
где  $L$  – длина образца, м;  $A_{изл}(f)$  – амплитуда Фурье излученного импульса, входящего в образец;  $A_{пр}(f)$  – амплитуда Фурье приемного импульса, прошедшего через образец.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном эксперименте изучены шесть типов горных пород (см. таблицу). На рис. 1, б показаны

#### Характеристики песчаников

№ п/п	Песчаник	Пористость, %	Проницаемость, мД	Водоудерживающая способность, %	Плотность объемная сухая, г/см <sup>3</sup>	Карбонатность, %	Скорости Р- и S-волн, м/с			
							водонасыщенные		сухие	
							V <sub>P</sub>	V <sub>S</sub>	V <sub>P</sub>	V <sub>S</sub>
1	Мелко-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	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



**Рис. 2.** Релаксационные спектры затухания продольной (а) и поперечной (б) волн сухих и водонасыщенных песчаников I группы.

Здесь и далее гидростатическое давление 24 МПа.

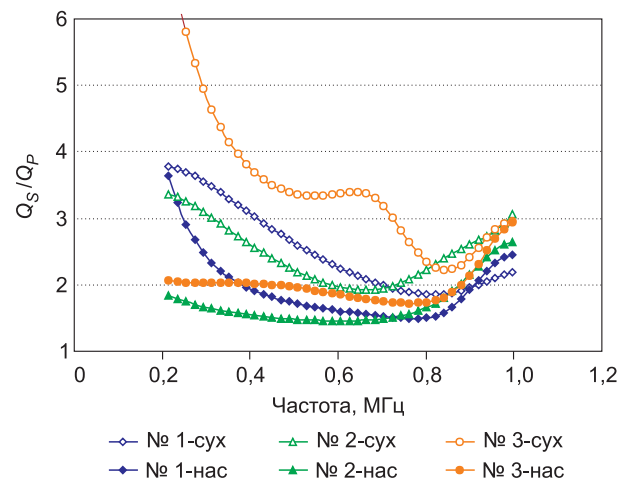
для примера импульсы продольной волны излученного и приемного сигналов и их спектры Фурье. Импульсы имеют простую форму с преобладающими частотами 0,56 и 0,37 МГц для  $P$ -волны и 0,41 и 0,32 МГц для  $S$ -волны соответственно.

Изучаемые песчаники разделены на две группы по признаку отклика характеристики затухания – на сухое и смоченное состояние. Релаксационные спектры затухания получены в частотной полосе 0,2–1,0 МГц путем вычисления величины затухания для каждой спектральной компоненты по формулам (4) и (5), а РСЗ  $P$ -волны песчаников первой группы представлены на рис. 2, а. Кривые РСЗ сухих песчаников располагаются выше (по оси инверсной добротности) одноименных РСЗ полностью водонасыщенных (в дальнейшем для краткости – насыщенных) песчаников. Насыщенные песчаники по сравнению с сухими характеризуются более простой формой РСЗ. Они имеют также более близкие величины затухания. Зависимость затухания от частоты  $Q_p^{-1} \sim f$  представлена в виде монотонного увеличения затухания с частотой (обр. № 2 имеет небольшое отклонение в низкочастотной области). Релаксационные спектры затухания сухих песчаников существенно отличаются от РСЗ насыщенных по величине и характеру. В образцах № 1, 2 уменьшение величины затухания с частотой происходит приблизительно как  $Q_p^{-1} \sim 1/f$  (как правая ветвь релаксационного пика). Релаксационные спектры затухания обр. № 3 имеют вид релаксационного пика с критической частотой  $f_{\text{пик}} = 0,664$  МГц.

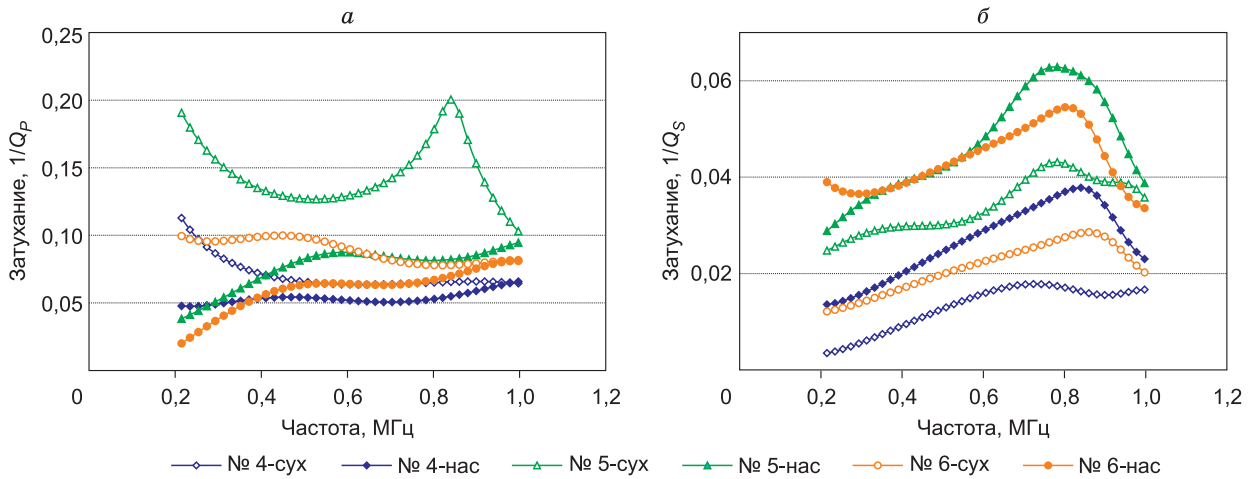
Релаксационные спектры затухания  $S$ -волны представлены на рис. 2, б. РСЗ  $S$ -волны образцов I группы имеют форму пиков затухания. У этих песчаников затухание  $S$ -волны намного ниже по сравнению с затуханием продольной волны. Величина затухания на пике  $Q_{S-\text{max}}^{-1}$  в сухих образцах выше по сравнению с насыщенными образцами. Однако во всем частотном диапазоне соотношение  $Q_{S-\text{сух}}^{-1} > Q_{S-\text{нас}}^{-1}$  сохраняется только для первых двух образцов. Ситуация с РСЗ  $S$ -волны в обр. № 3 является промежуточной при переходе к образцам II группы (о чем будет сказано ниже). Повышенное затухание для сухого состо-

яния в обр. № 3 отмечается только в околопиковой области. В низкочастотной области пика наблюдается перехлест кривых сухого и насыщенного состояния. На низких частотах затухание в насыщенном песчанике превышает затухание в сухом песчанике. Пиковая частота в первом и третьем образцах  $f_{\text{пик}} \approx 0,79$  МГц не изменяется при смене в песчанике сухого состояния на водонасыщенное. В обр. № 2 в сухом состоянии  $f_{\text{пик}} = 0,64$  МГц, а при насыщении пиковая частота возрастает до  $f_{\text{пик}} = 0,72$  МГц.

Для прояснения возможности отличия сухих и насыщенных песчаников по характеристикам РСЗ был использован параметр отношения затухания продольной волны к затуханию поперечной волны  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$ . Частотная зависимость отношения  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}(f)$  для песчаников первой группы представлена на рис. 3. Величина этого отношения у всех сухих образцов (включая “промежуточный” обр. № 3) больше, чем у насыщенных образцов во всем частотном диапазоне. Кривая  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}(f)$  у обр. № 1 имеет



**Рис. 3.** Зависимость отношения затухания продольной волны к затуханию поперечной волны от частоты в сухих и водонасыщенных песчаниках I группы.



**Рис. 4.** Релаксационные спектры затухания продольной (а) и поперечной (б) волн сухих и водонасыщенных песчаников II группы.

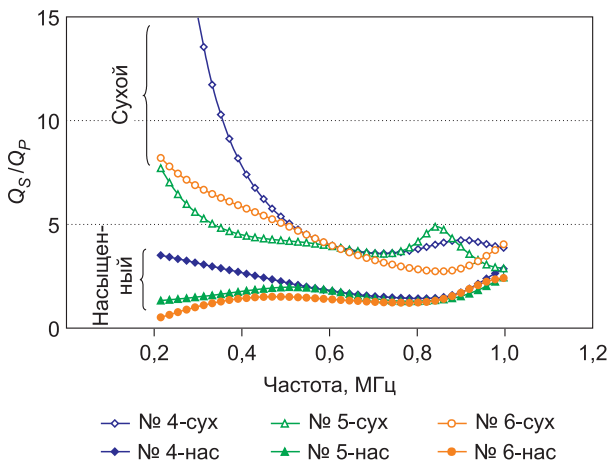
заметный минимум на частоте около 0,8 МГц, который соответствует пику  $Q_S^{-1}$  сухого и насыщенного песчаника на рис. 2, б. Минимум на кривой отношения затухания  $P$ -волны к  $S$ -волне у обр. № 2 отвечает пику  $Q_S^{-1}$  сухого песчаника. У обр. № 3 на кривой  $Q_P^{-1}/Q_S^{-1}(f)$  имеется локальный пик, частота которого соответствует пику продольной волны  $f_{\text{пик}} = 0,664$  МГц на рис. 2, а. Несмотря на вышеописанные отклонения обр. № 3, характер его зависимости  $Q_P^{-1}/Q_S^{-1}(f)$  не выходит из общего ряда. Этот образец отличается значительно большей величиной отношения  $Q_P^{-1}/Q_S^{-1}$  по сравнению с другими образцами первой группы.

Релаксационные спектры затухания  $P$ -волны сухих и водонасыщенных песчаников II группы представлены на рис. 4, а. Как и у песчаников I группы, здесь затухание в сухих песчаниках выше, чем в водонасыщенных во всем частотном диапазоне. Изменение затухания с частотой имеет примерно тот же характер, что и у песчаников I группы. В сухом обр. № 5 наблюдается релаксационный пик на частоте 0,84 МГц.

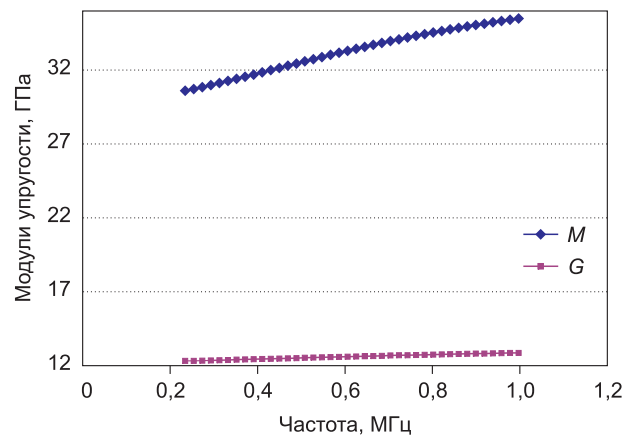
Релаксационные спектры затухания  $S$ -волны сухих и водонасыщенных песчаников II группы пред-

ставлены на рис. 4, б. Как и для аналогичных песчаников I группы, их РСЗ имеют вид пиков затухания. Отличительная особенность частотных зависимостей затухания  $S$ -волны песчаников второй группы от первой состоит в том, что величина затухания при водонасыщении превышает затухание в сухом состоянии во всем частотном диапазоне. В обр. № 4 в сухом состоянии  $f_{\text{пик}} = 0,72$  МГц, а при насыщении пиковая частота возрастает до  $f_{\text{пик}} = 0,84$  МГц. При водонасыщении обр. № 5 пиковая частота не изменяется –  $f_{\text{пик}} = 0,782$  МГц, а в обр. № 6 она незначительно уменьшается – от 0,86 до 0,8 МГц.

Частотная зависимость отношения  $Q_P^{-1}/Q_S^{-1}(f)$  для песчаников второй группы представлена на рис. 5. Величина этого отношения для сухих образцов больше, чем для водонасыщенных во всем частотном диапазоне. Кривые  $Q_P^{-1}/Q_S^{-1}(f)$  имеют слабый минимум в диапазоне частот около (0,8–0,84) МГц, но в обр. № 5 имеется локальный максимум на частоте 0,84 МГц. Водонасыщенные образцы характеризуются большой кучностью зависимостей  $Q_P^{-1}/Q_S^{-1}(f)$  и малым отличием величины затухания между собой. Обращает на себя внимание неожиданный результат.



**Рис. 5.** Зависимость отношения затухания продольной волны к затуханию поперечной волны от частоты в сухих и водонасыщенных песчаниках II группы.



**Рис. 6.** Частотная дисперсия модулей упругости продольной и поперечной волны в сухом песчанике № 3.

Несмотря на принципиальное различие РСЗ  $S$ -волны песчаников первой и второй группы на водонасыщенность, отклик зависимостей  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}(f)$  обеих групп песчаников на этот процесс совершенно одинаковый. Величина затухания в песчанике в сухом состоянии всегда выше, чем затухание в полноводонасыщенном состоянии.

Следует отметить, что форма релаксационных пиков (прежде всего это относится к затуханию  $P$ -волны) в общем соответствует модели СЛТ, описываемой выражением (1). Используя наши экспериментальные данные о  $Q_p^{-1}(f)$ ,  $Q_s^{-1}(f)$  и  $Q_{p-\max}^{-1}$ ,  $Q_{s-\max}^{-1}$  и следующую формулу для расчетов модулей [5], установим характер частотной дисперсии модуля упругости  $M(f)$ :

$$M(f) = \frac{M_r M_\infty \left[ 1 + (f/f_{\text{пик}})^2 \right]}{M_\infty + M_r (f/f_{\text{пик}})^2}, \quad (6)$$

$$G(f) = \frac{G_r G_\infty \left[ 1 + (f/f_{\text{пик}})^2 \right]}{G_\infty + G_r (f/f_{\text{пик}})^2}.$$

На рис. 6 показана частотная дисперсия модуля продольной  $M(f)$  и поперечной  $G(f)$  волны сухого обр. № 3. Изменение “экспериментальных” модулей с частотой качественно соответствует теоретическим кривым, описанным в [5].

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований влияния водонасыщенности на релаксационные спектры затухания продольных и поперечных волн в различных песчаниках можно сделать следующие выводы.

1. Затухание ультразвуковых волн в диапазоне частот 0,2–1,0 МГц при гидростатическом давлении 24 МПа как в сухих, так и полноводонасыщенных песчаниках является частотно-зависимым. Релаксационные спектры затухания имеют вид зависимостей  $Q_{p,s}^{-1} \sim f$ ,  $Q_{p,s}^{-1} 1/f$  и форму релаксационного пика.

2. Водонасыщение вызывает уменьшение величины затухания продольной волны у всех изученных песчаников. Для поперечной волны та же самая ситуация наблюдается только в песчаниках первой группы, а для второй группы водонасыщение увеличивает затухание  $S$ -волны.

3. Водонасыщенное и сухое состояние в песчаниках различаются однозначно по параметру частотной зависимости отношения затухания продольной волны к затуханию поперечной волны  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}(f)$ .

#### Литература

1. Dvorkin J., Nur A. Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the biot mechanisms // *Geophysics*. 1993. V. 58. P. 524–533.
2. Dvorkin J., Prasad M., Sakai A., Lavoie D. Elasticity of marine sediments // *GRL*. 1999. V. 26. P. 1781–1784.
3. Mavko G., Dvorkin J. P-wave attenuation in reservoir and non-reservoir rock // *EAGE 67th Conference and Exhibition*. Madrid; Spain, 2005. P. 1–2.
4. Dvorkin J., Walls J., Taner T., Derzhi N., Mavko G. Attenuation at patchy Saturation // *A Model EAGE 65th Conference and Exhibition*. Stavanger, Norway, 2003. P. 1–4.
5. Mavko G.M., Mukerji T., Dvorkin J. *Rock physics handbook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 329 p.
6. Cadoret T., Marion D., Zinsner B. Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 9789–9803.
7. 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.
8. Sun X., Tang X., Cheng C.H., Frazer L.N.  $P$ - and  $S$ -waves logs from monopole sonic data // *Geophysics*. 2000. V. 65. P. 755–765.
9. Adam L., Batzle M., Lewallen K.T., van Wijk K. Sismic wave attenuation in carbonates // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. B06208.
10. Mashinskii E.I. Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure // *J. Geophys. Eng.* 2006. N 3. P. 291–306.
11. Mashinskii E.I. Amplitude-frequency Dependencies of Wave Attenuation in Single-Crystal Quartz: Experimental Study // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B11304.
12. 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.
13. Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88, B 11. P. 9493–9499.