

СКОРОСТИ ВОЛН И ПОГЛОЩЕНИЕ В КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПОРОДАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Б.В. Пашков, Э.И. Машинский

Институт геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Проанализированы имеющиеся данные по зависимостям скоростей волн и поглощения от напряжения в породах и проведены собственные эксперименты на монокристаллах природного кварца и песчаника. Результаты экспериментов показывают уменьшение скорости волны и увеличение коэффициента поглощения с повышением напряжения в монокристалле природного кварца. Уменьшение скорости P -, S -волн наблюдается также в песчанике при изменении порового давления и фиксированном гидростатическом давлении. Имеются открытые петли гистерезиса скорости волны и коэффициента поглощения при полном цикле нагрузка—разгрузка.

Нелинейность, гистерезис, скорости волн и поглощение.

SEISMIC VELOCITIES AND ATTENUATION IN PRESURRIZED CONSOLIDATED ROCKS

B.V. Pashkov and E.I. Mashinsky

Stress dependence of seismic velocities and attenuation has been studied using the available reported data and original laboratory experiments on quartz single crystals and sandstone samples. The experiments show velocity decrease and attenuation increase with stress in quartz crystals. P and S velocities in sandstone also decrease with changing pore pressure at invariable hydrostatic pressure. The velocity and attenuation functions show open hysteresis loops in a full loading-unloading cycle.

Nonlinearity, hysteresis, P and S velocities, attenuation

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интенсивно развивается нетрадиционное направление в сейсмике, представляющее новую парадигму распространения сейсмических волн [1—3]. Согласно этому подходу, горную породу представляют в виде набора большого числа элементов малого размера, которые индивидуально обладают свойствами гистерезиса и дискретной памяти. Комбинации этих элементов дают неограниченное число соотношений состояния, которые, как считается, более реально описывают геологическую среду. Эта теория, в отличие от традиционной нелинейной, хорошо согласуется с экспериментальными данными [4, 5]. Центральное место в этой теории занимает соотношение напряжение—деформация $\sigma(\epsilon)$, которое определяет поведение статического и динамического модулей упругости.

Экспериментально установлено, что кривые $\sigma(\epsilon)$ имеют многоуровневый характер, т. е. наклон этих кривых в осях координат изменяется в зависимости от уровня прикладываемой энергии [6, 7]. При этом статический и динамический модули упругости являются зависимыми от величины деформации. Это имеет фундаментальное значение, так как соотношение динамический модуль—напряжение входит в уравнение движения и вносит в него нелинейность. Поэтому изучение характера этой зависимости является актуальным.

Обычно динамический модуль (скорость волны) с увеличением напряжения возрастает. Однако, согласно работам [1, 2], возможна и обратная ситуация, когда модуль с увеличением напряжения падает. Это зависит от характера кривизны $\sigma(\epsilon)$, которая может быть (по терминологии авторов) как положительной, так и отрицательной. При положительной кривизне $\sigma(\epsilon)$ с увеличением напряжения модуль возрастает, а при отрицательной — падает. В первом случае скорость возрастания модуля с напряжением увеличивается, а во втором — уменьшается.

В сейсмической литературе вопрос зависимости динамического модуля от напряжения в такой постановке раньше не рассматривался, хотя зависимость скоростей волн от давления исследовалась давно. Нами проанализированы имеющиеся данные и проведены собственные эксперименты по изучению зависимости скоростей волн и поглощения от напряжения в консолидированных осадочных породах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Краткий обзор. Общая характеристика зависимости скоростей волн $V_P(\sigma)$, $V_S(\sigma)$ и декремента затухания $Q^{-1}(\sigma)$ от напряжения является следующей. Как правило, для консолидированных осадочных

пород с увеличением напряжения скорости волн увеличиваются, а затухание уменьшается [8]. Зависимости этих параметров от напряжения имеют вид кривых с положительной и отрицательной кривизной. Такие кривые наблюдаются как для аксиального, так и неаксиального напряжения в сухих трещиноватых и насыщенных породах [9]. Повторные измерения этих параметров в замкнутом цикле напряжения показывают сдвиг кривых в сторону увеличения скоростей волн [10].

Зависимости скоростей волн и декремента затухания от напряжения имеют гистерезис, характер которого существенно меняется при изменении физического состояния породы. В сухой породе наблюдается либо замкнутый гистерезис, либо он вовсе отсутствует. В водонасыщенной породе петля гистерезиса не замкнута и имеются остаточные составляющие скорости и затухания [7]. Однако при переходе к достаточно малым напряжениям (<1 МПа) это правило может нарушаться и появляется незамкнутый гистерезис. Таким образом, характер кривизны графика скорость волны—напряжение зависит от диапазона напряжений, в котором рассматривается эта зависимость. Так, например, у песчаника на малых напряжениях (10^{-3} — 10^{-1} МПа) кривая V_p (σ) является положительной, а в диапазоне 10^{-1} — 10^1 МПа — отрицательной [8]. Это означает, что в области малых напряжений динамический модуль с возрастанием напряжения увеличивается, а по мере дальнейшего увеличения напряжения — уменьшается. Этот факт еще раз подтверждает многоуровневый характер зависимости скорости волны—напряжение [6].

Следует также отметить интересную особенность некоторых водонасыщенных пород (например, песчаник и известняк), имеющих принципиально различный характер наблюдаемого гистерезиса [8]. У песчаника кривая V_p , полученная в течение разгрузки, как и положено, идет выше кривой, полученной во время нагрузки. Однако у известняка, наоборот, ветвь петли гистерезиса в период разгрузки располагается ниже ветви периода нагрузки. Это означает, что скорость волны при разгрузке имеет меньшую величину, чем при нагрузке при том же самом давлении.

Собственные эксперименты, выполненные в Институте геофизики СО РАН, подтвердили принципиальные положения о зависимостях скоростей волн и затухания, изложенные выше. Однако получены и новые результаты, которые расширяют представления о нелинейном поведении пород.

Эксперименты по изучению комплекса акустических характеристик в породах проводились в камере высокого давления, позволяющей воспроизводить горное давление путем гидростатического сжатия образца до 80 МПа (при комнатной температуре). Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Имеется камера давления, в которую помещается образец, заключенный в эластичную оболочку (1) и акустический тракт, который содержит: акустическую задержку (2), образец (3) и акустическую нагрузку (4). На свободной торцевой поверхности акустической задержки жестко закреплены два пьезоэлемента (5 и 6) для возбуждения и приема P - и S -волн. Давление σ на образец передается через эластичный стакан и акустическую нагрузку. Прием и возбуждение P - и S -волн выполняется по схеме зондирования—прием отраженных сигналов в определенной последовательности широкополосными импульсами с преобладающей частотой 0,83 МГц. Отраженные сигналы регистрировались специально разработанным измерительным комплексом в цифровом виде и подвергались обработке.

Относительную погрешность измерения скорости волны можно оценить по формуле [11]:

$$dV/V = dH/H + dT/T,$$

где H — толщина образца; T — разность времен вступления волны; dH , dT — абсолютные ошибки измерения соответственно H и T . Для образцов с $H \sim 20$ мм и $T \sim 12$ мкс рассчитанная величина $dH/H \sim 0,05\%$ и $dT/T \sim 0,15\%$. Фактически расхождение величин скоростей волн при многократных испытаниях на одной амплитуде не превышает 0,3%, что определяет точность измерения в наших экспериментах. Множество дублирующих измерений на одном образце в идентичных условиях показывает относительную точность измерения, которая является много выше, чем абсолютная.

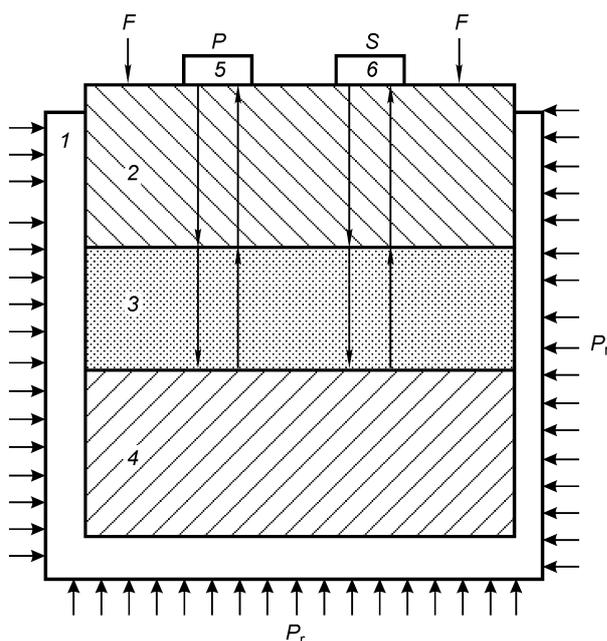


Рис. 1. Схема измерительной установки.

1 — эластичный стакан; 2 — акустическая задержка; 3 — образец; 4 — акустическая нагрузка; 5, 6 — пьезоэлементы продольной и поперечной волн: F — осевая нагрузка, P_r — гидростатическое давление.

Следует подчеркнуть, что для нас представляет интерес не измерение абсолютного значения скорости волны, а относительное изменение этого параметра, т. е. качественная картина поведения скорости волны и коэффициента поглощения с изменением давления. В этом смысле указанная величина относительной точности измерения (0,3 %) является достоверной.

Эксперименты проводились на образцах консолидированных осадочных пород (песчаники) и монокристаллах кварца. Кварц был взят в качестве испытуемого как более „простой“ по строению материал по сравнению с породами, т. е. не имеющий зерен и их соединений. В то же время он широко входит в состав многих пород. Вначале предполагалось, что монокристалл природного кварца может быть использован как тестовый материал, однако, забегаая вперед, можно сказать, что это предположение не подтвердилось. Мы использовали монокристаллы прозрачного и дымчатого кварца. Последний отличается от прозрачного кварца наличием примесей, которые создают окраску. Однако, в принципе, это тот же диоксид кремния. Прозрачный кварц был представлен двумя образцами — ненарушенный и нарушенный (содержит сеть мельчайших трещин). Получены следующие результаты.

Монокристаллы кварца. 1. *Прозрачный ненарушенный кварц.* V_p с повышением напряжения увеличивается, а V_s почти не изменяется (рис. 2). Поведение коэффициента поглощения сложное (рис. 3): в диапазоне давлений до 30 МПа его величина возрастает, а после — падает. Для S -волны наблюдается обратная картина: сначала коэффициент поглощения интенсивно уменьшается, а затем менее интенсивно увеличивается. 2. *Прозрачный нарушенный кварц.* Поведение скорости продольной волны качественно не отличается от скорости в ненарушенном кварце. Однако поведение скорости поперечной волны отличается зависимостью ее величины от напряжения (рис. 4). 3. *Дымчатый кварц.* Поведение скорости продольной волны укладывается в рамки существующих представлений (рис. 5). Однако поведение скорости поперечной волны необычное: в диапазоне 10—20 МПа скорость увеличивается, при дальнейшем увеличении давления уменьшается. Такое anomальное поведение скорости подтверждается соответствующим графиком для коэффициента поглощения (рис. 6). В диапазоне 10—20 МПа поглощение S -волны падает, а при дальнейшем увеличении давления возрастает. Поведение коэффициента поглощения для продольной волны соответствует ранее установленному поведению скорости — с увеличением давления скорость увеличивается, а поглощение падает.

Необходимо заметить, что повторные кривые показывают качественное совпадение графиков. Замеченное отклонение первой из дублирующих кривых исчезает, приводя к стабилизации результатов.

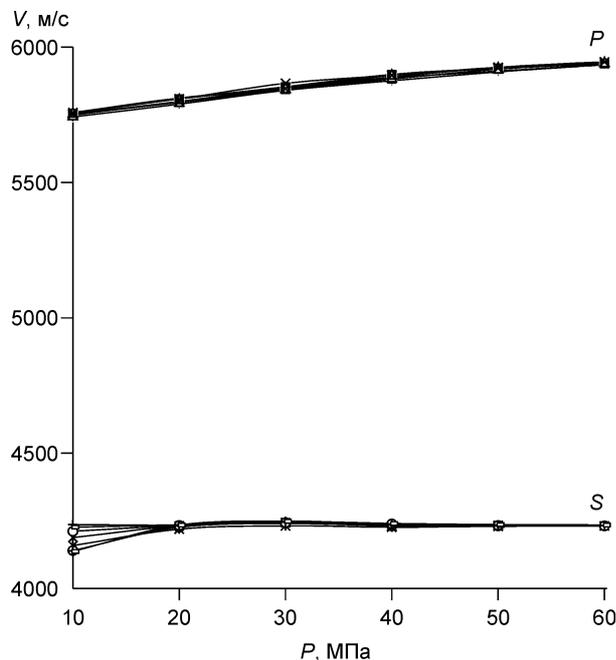


Рис. 2. Зависимость скоростей продольных и поперечных волн в монокристалле ненарушенного природного кварца.

Четыре дублирующих измерения.

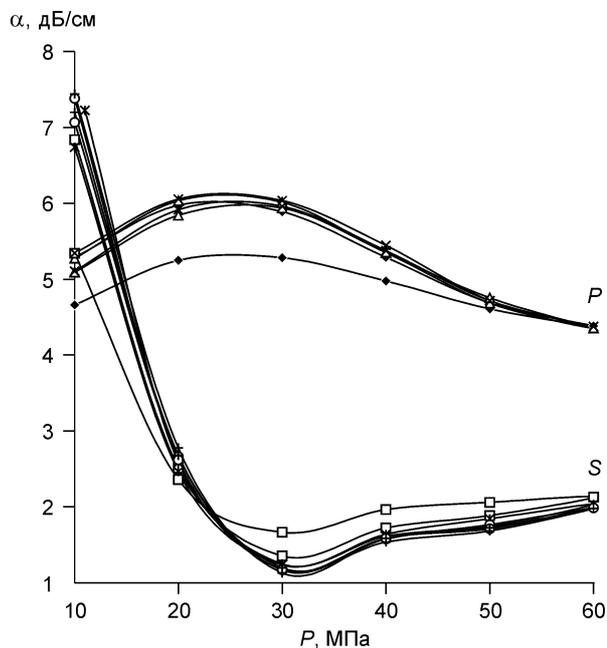


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения продольных и поперечных волн от гидростатического давления в монокристалле ненарушенного природного кварца.

Четыре дублирующих измерения.

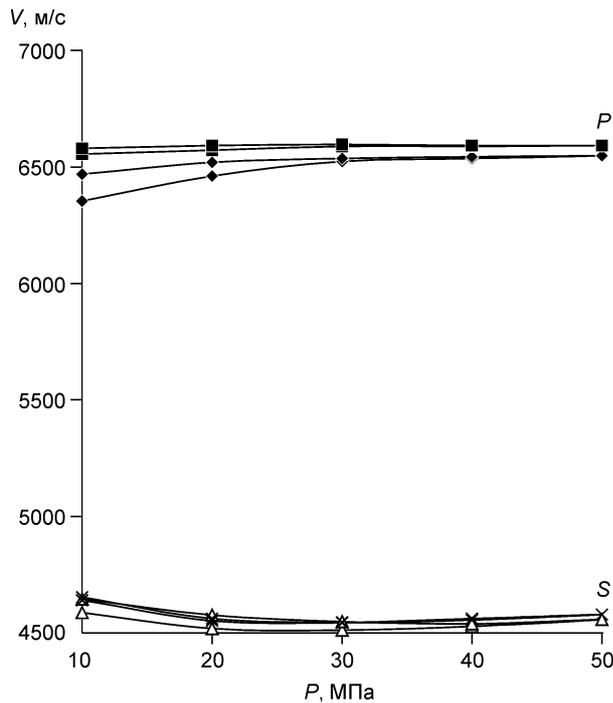


Рис. 4. Зависимость скоростей продольных и поперечных волн в монокристалле нарушенного природного кварца.

Два дублирующих измерения.

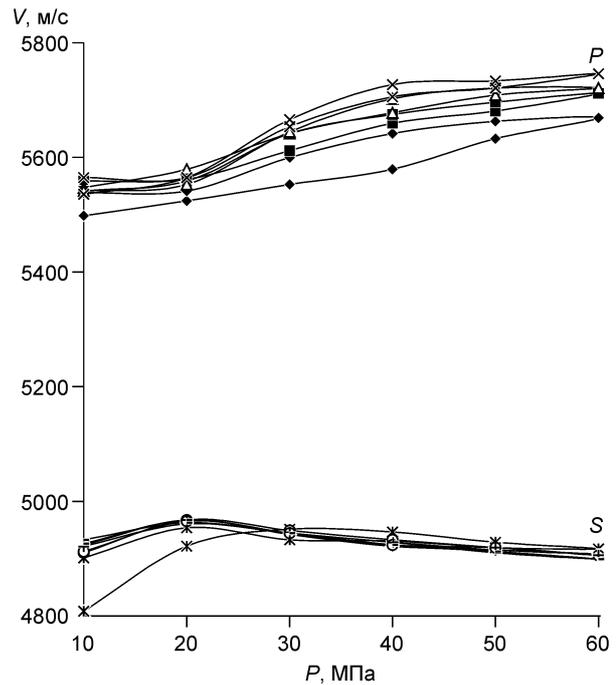


Рис. 5. Зависимость скоростей продольных и поперечных волн в монокристалле дымчатого природного кварца.

Четыре дублирующих измерения.

Измерения в дымчатом кварце показывают необычное поведение V_S — увеличение напряжения приводит к уменьшению скорости на 3%. Уменьшение скорости волны раньше отмечалось только в поликристаллических породах при изменении дифференциального давления. Другой факт достоин внимания. Открытая петля гистерезиса и наличие остаточной составляющей скорости (несовпадение величин скоростей после снятия напряжения) является признаком необратимых процессов в твердом теле, оказывающих влияние на динамический модуль упругости (скорость волны). Наличие остаточной деформации свидетельствует о процессе микропластичности, который ранее наблюдался в монокристалле кварца при растяжении в этом же диапазоне деформаций [7]. Релаксационная составляющая деформации в кварце, по-видимому, является малой по сравнению с микропластической компонентой, так как период релаксации у кварца очень большой. Для наблюдения вязкоупругой (релаксационной) деформации требуется значительный промежуток времени. Процесс микропластичности происходит „мгновенно“ при превышении величины напряжения опреде-

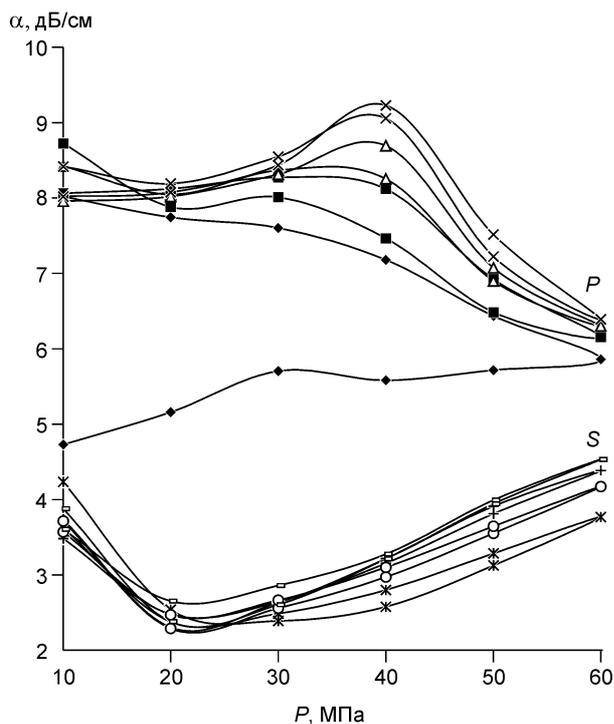


Рис. 6. Зависимость коэффициента поглощения продольных и поперечных волн от гидростатического давления в монокристалле дымчатого природного кварца.

Четыре дублирующих измерения.

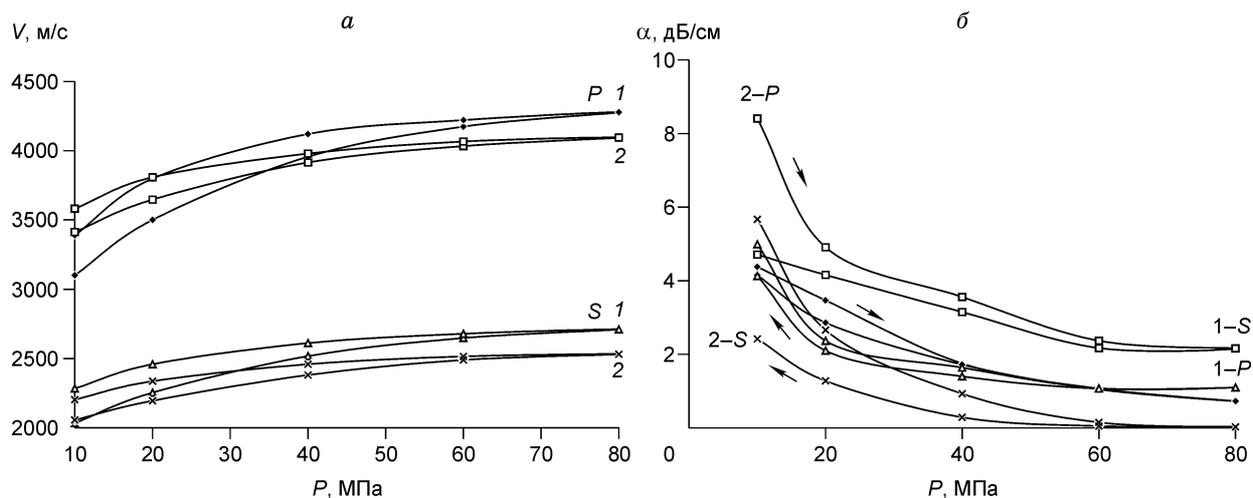


Рис. 7. Зависимости скоростей (а) и коэффициента поглощения (б) продольных и поперечных волн от гидростатического давления в песчанике.

1, 2 — дублирующие измерения.

ленного порога. Следует также отметить, что изменение коэффициента поглощения с изменением давления по сравнению со скоростью волны во много раз больше.

Песчаники. Типичная картина поведения скоростей волн и коэффициента поглощения в песчанике-коллекторе представлена на рис. 7. Наибольшее увеличение V_P и V_S происходит на малых давлениях. Соответственно коэффициент поглощения уменьшается с ростом давления. В песчанике наблюдается гистерезис открытого типа. Изменения коэффициента поглощения по сравнению со скоростями волн во много раз выше. Они могут быть больше на один—два порядка (см. рис. 7, б для S-волны).

Поведение скоростей продольных и поперечных волн в песчанике принципиально меняется, когда всестороннее давление зафиксировано на одной величине (20 МПа), а вводится переменное поровое давление (рис. 8). Скорости волн с увеличением порового давления уменьшаются. Коэффициент погло-

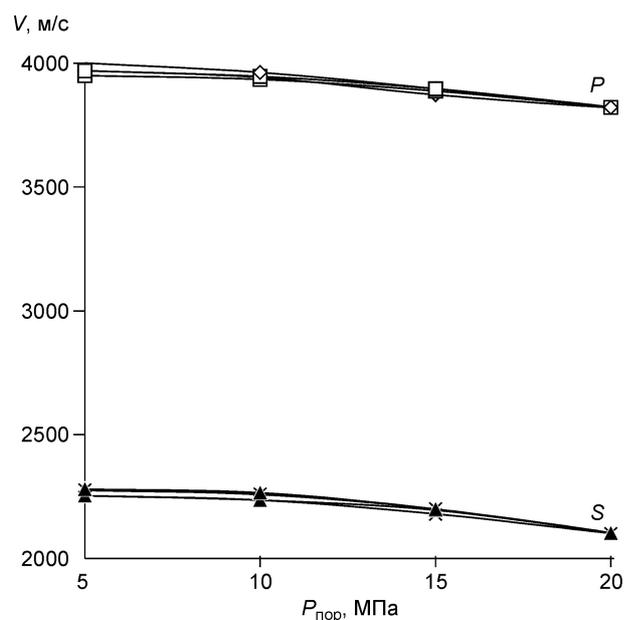


Рис. 8. Зависимости скоростей P-, S-волн от порового давления в песчанике.

Два измерения.

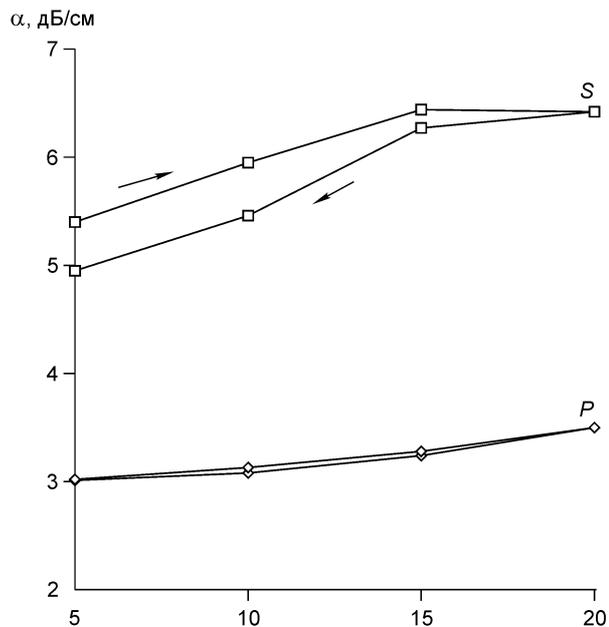


Рис. 9. Зависимости коэффициента поглощения P-, S-волн от порового давления в песчанике.

щения продольных и поперечных волн увеличивается (рис. 9). Для скоростей волн отмечается открытая петля гистерезиса (остаточная величина около 1 %). Коэффициент поглощения продольной волны имеет замкнутую петлю гистерезиса, а для поперечной волны петля гистерезиса открытая (несовпадение величин более 8 %). Коэффициент поглощения поперечной волны выше, чем продольной.

ВЫВОДЫ

Мезоскопическая теория для описания нелинейной геологической среды [1, 2] предсказывает многозначные и неоднородные уравнения состояния. Нелинейность соотношения динамический модуль—напряжение приводит к некоторым нелинейным эффектам. Эксперименты подтверждают сложный характер зависимости динамического модуля от напряжения. Имеется как увеличение, так и уменьшение динамического модуля или скорости продольных и поперечных волн с ростом напряжения.

Для правильного представления о характере зависимости скорости волны от напряжения необходимо указывать диапазон напряжений, для которого определена эта зависимость. В общем случае на одном участке давлений скорость волны может увеличиваться с увеличением давления, а на другом уменьшаться и наоборот. Этот факт был отмечен и ранее авторами работы [8], где используемый диапазон напряжений достигал трех порядков. Однако этот факт оставался в стороне интересов исследователей. Другой важный фактор — влияние насыщения породы на кинематические и динамические параметры волн. Насыщение вносит еще более сильную неоднородность и многозначность в зависимость скорости волны и поглощения от величины напряжения. Необходимо также отметить более сильную чувствительность к вариациям напряжения характеристики поглощения по сравнению со скоростью волны. Можно предположить, что такое положение будет иметь место и для амплитудной зависимости скоростей волн и поглощения. Отдельные экспериментальные подтверждения этого получены при изучении амплитудной зависимости скорости волны в лабораторных и полевых условиях [12—14]. Зависимость скоростей волн и затухания от амплитуды должна быть изучена на различных уровнях давлений на образец. Характер этой зависимости может меняться на разных уровнях гидростатического давления.

Основные выводы могут быть следующие.

В общем случае поведение исследуемых пород соответствует общеизвестным экспериментальным результатам. Наш результат состоит в обнаружении уменьшения скорости волны и увеличения коэффициента поглощения с увеличением напряжения в монокристалле природного кварца. Уменьшение скорости волны также имеет место в песчанике при вариации порового давления на фиксированном гидростатическом давлении.

В заключение можно сказать, что эти исследования следует продолжить в направлении сравнения сухих и флюидонасыщенных пород по параметрам гистерезиса. Дальнейшее направление этих исследований может быть направлено на изучение амплитудной зависимости скоростей волн и затухания, так как последние характеристики непосредственно связаны с изученными нами зависимостями. Особенно перспективными являются нелинейные эффекты затухания, которые в новом качестве могут быть использованы как диагностические признаки при дифференциации пород по вещественному составу и флюидонасыщению.

Авторы выражают благодарность академику РАН С.В. Гольдину за ценные замечания и пожелания, позволившие значительно улучшить работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. **McCall K.R., and Guyer R.A.** Equation of states and wave propagation in hysteresis nonlinear elastic materials // *J. Geophys. Res.*, 1994, v. 99, № B12, p. 23887—23897.
2. **Guyer R.A., McCall K.R., Boitnott G.N.** Hysteresis, discrete memory and nonlinear wave propagation in rock: A new paradigm // *Phys. Rev. Lett.*, 1995, v. 74, № 17, p. 3491—3494.
3. **Назаров В.Е., Радостин А.В., Островский Л.А., Соустова И.А.** Упругие волны в средах с гистерезисной нелинейностью // *Методы акустической диагностики неоднородных сред*. Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2002, 276 с.
4. **Holcomb D.B.** Memory, relaxation, and microfracturing in dilatant rock // *J. Geophys. Res.*, 1981, v. 86, № B12, p. 6235—6248.
5. **McCall K.R., Guyer R.A.** A new theoretical paradigm to describe hysteresis, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock // *Nonlinear Proc. Geophys.*, 1996, v. 3, p. 89—101.
6. **Машинский Э.И.** Нелинейность квазистатической связи напряжение—деформация: зависимость от уровня механической энергии // *Геофизика*, 2001, № 2, с. 37—41.
7. **Mashinsky E.I.** Quasi-micro-plasticity processes and nonlinear seismicity // *Physics of the Solid Earth* (Washington, DC, United States), 1994, v. 30, № 2, p. 97—102.

8. **Zinszner B., Johnson P.A., and 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, v. 102, № B4, p. 8105—8120.
9. **Johnson P.A., and Rasolofosoan P.N.J.** Nonlinear elasticity and stress-induced anisotropy in rock // *J. Geophys. Res.*, 1996, v. 101, № B2, p. 3113—3124.
10. **Tutuncu A.N., Podio A.L., Sharma M.M.** An experimental investigation of factor influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones // *Geophysics*, 1994, v. 59, № 1, p. 77—86.
11. **Королев М.В., Карпельсон А.Е.** Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М., Машиностроение, 1982, 274 с.
12. **Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И.** Экспериментальное исследование самовоздействия сейсмоакустических волн // *Акустический журнал*, 1999, т. 45, № 6, с. 799—806.
13. **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—622.
14. **Mashinskii E.I.** The variants of the strain-amplitude dependence of elastic wave velocities in the rocks under pressure // *J. Geophys. Engineering*, 2004, v. 1, № 4, p. 295—306.

*Рекомендована к печати 22 апреля 2005 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 31 июля 2003 г.,
после доработки — 14 апреля 2005 г.*