

АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОХОДЯЩЕЙ ВОЛНЕ В СЦЕМЕНТИРОВАННОМ ПЕСЧАНИКЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Э.И. Машинский, Г.В. Егоров

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

Представлены результаты экспериментов по изучению влияния переменных амплитуды и давления на скорость и затухание продольной стержневой волны в образце сцементированного песчаника. Измерения выполнены на проходящих волнах на преобладающей частоте импульса 6.8 кГц в диапазоне амплитуд деформации $A^e \approx (0.2—2.4) \cdot 10^{-6}$ и статическом аксиальном давлении от 0.25 до 1.0 МПа. Скорость волны слабо зависит от амплитуды и при ее увеличении незначительно уменьшается. С увеличением давления скорость нелинейно возрастает (до 6 %) на всех величинах амплитуд. Затухание (Q_e^{-1}) линейно увеличивается (до 2.5 %) с увеличением амплитуды и нелинейно уменьшается с ростом давления. Имеется аномальное изменение затухания в диапазоне давления 0.5—0.75 МПа, где Q_e^{-1} уменьшается до 30 % на всех амплитудах. Эти результаты могут быть полезны для совершенствования акустических и сейсмических методов диагностики.

Нелинейность, неупругие сейсмические параметры, амплитудно-зависимые скорость волны и затухание.

AMPLITUDE-DEPENDENT EFFECTS IN A TRANSMITTED WAVE IN CEMENTED SANDSTONE UNDER PRESSURE

E.I. Mashinskii and G.V. Egorov

This paper presents the results of experiments on the effect of variable amplitude and pressure on the P -wave velocity and attenuation in cemented sandstone sample. The measurements were performed in transmitted waves at a predominant pulse frequency of 6.8 kHz in the range of strain amplitudes $A^e = (0.2—2.4) \cdot 10^{-6}$ at an axial static pressure of 0.25 MPa to 1.0 MPa. The wave velocity depends weakly on the amplitude and decreases only slightly with its increase. With increasing pressure the velocity v_e nonlinearly increases (to 6%) at all amplitudes. The attenuation Q_e increases linearly (to 2.5%) with increasing amplitude and decreases nonlinearly with increasing pressure. There is an anomalous change in the attenuation in the pressure range (0.5–0.75) MPa, where it decreases to 30 % at all amplitudes. These results may be useful for improving acoustic and seismic methods of diagnostics.

Nonlinearity, inelastic seismic parameters, amplitude-dependent wave velocity and attenuation

ВВЕДЕНИЕ

Повышение геологической эффективности сейсмических и акустических методов ожидается на основе привлечения новых знаний о физике распространения упругих волн. Нелинейно-неупругие проявления в породах могут быть использованы в качестве эффективных диагностических и дополнительных поисковых критериев. Нелинейность эффективно проявляется, например, при облучении пород би-гармоническими упругими волнами [Егоров, 1995, 2004, 2005, 2007]. В сейсмике наиболее известны следующие нелинейные проявления. Это частотные преобразования, высшие гармоники в спектре, амплитудная зависимость скоростей волн и затухания, гистерезис [Stewart et al., 1983; Winkler, 1985; Mashinskii, 1994, 2004; Johnson et al., 1996; Van Den Abeele et al., 1997; Mavko et al., 1998; Машинский и др., 1999; Zaitsev et al., 1999; Ostrovsky, Johnson, 2001; Машинский, 2003, 2006, 2007; Dvorkin et al., 2003; Mavko, Dvorkin, 2005].

За последнее время с накоплением знаний и появлением некоторых перспектив прикладного характера усилился интерес к изучению влияния амплитудного фактора на параметры сейсмических волн. Относительно недавно произошел качественный прорыв в этой области. Длительное время считалось, что влияние величины амплитуды сводится к однозначному изменению скорости волны и затухания. С увеличением амплитуды деформации скорость волны всегда уменьшается, а затухание увеличивается. Например, в классической работе [Winkler et al., 1979] демонстрируется нелинейное поведение песчаников в виде уменьшения v_p и увеличения Q_p^{-1} , начиная с амплитуды деформации $\varepsilon > 10^{-6}$. Скорость волны слабо зависит от амплитуды и ее изменение не превышает 1 % в используемом амплитудном диапазоне.

Величина затухания при этом в том же диапазоне изменяется в несколько раз больше. Качественный характер такой амплитудной зависимости был многократно подтвержден с использованием резонансного метода [Johnson et al., 1996; Ten Cate, Shankland, 1996; Van Den Abeele et al., 1997; Ostrovsky, Johnson, 2001].

Относительно недавно было установлено нестандартное поведение скорости распространения акустических и сейсмических волн при изменении интенсивности излучаемого импульса [Машинский и др., 1999; Zaitsev et al., 1999; Машинский, 2003; Mashinskii, 2004, 2005a,b]. В экспериментах на образцах пород и *in situ* было показано, что скорость волны с увеличением амплитуды может не только уменьшаться, но и возрастать. Это противоречит классической теории и экспериментальным данным, в которых наблюдалось только уменьшение скорости волны с увеличением амплитуды [Winkler et al., 1979; Winkler, Plona, 1982; Stewart et al., 1983; Tutuncu et al., 1994; Winkler, 1985; Johnson et al., 1996; Zinszner et al., 1997; Ostrovsky, Johnson, 2001].

Новые данные расширили представления о влиянии амплитудного фактора на скорость распространения волн и послужили основой для постановки дальнейших исследований. Были получены также новые факты об амплитудной зависимости затухания [Mashinskii, 2005a, 2006]. В частности, был установлен ранее не известный эффект увеличения добротности горных пород, регистрируемый при увеличении интенсивности импульсного воздействия. Уменьшение затухания в песчаниках, алевролитах и других материалах идет по нелинейному закону различного характера. Дальнейшее изучение этого эффекта на продольных и поперечных волнах показало существенное различие параметров амплитудно-зависимого затухания в сухих и водонасыщенных породах [Mashinskii, 2007]. Помимо этого был обнаружен эффект влияния величины амплитуды импульса на параметры релаксационных спектров затухания продольных и поперечных волн. Оказалось, что ширина релаксационного пика затухания S -волны зависит от водонасыщения породы. Эксперимент показал значительное отличие водонасыщенного и сухого песчаника по этому признаку. Последующая работа в этом направлении, выполненная в том же самом амплитудном и частотном диапазоне, продвинула понимание механизмов затухания волн [Mashinskii, 2008]. Было показано, что работающие на мезоуровне механизмы затухания могут иметь место и на уровне отдельного зерна.

Предполагается, что релаксационные и другие нелинейные эффекты могут быть использованы при создании новых диагностических методов для решения прикладных задач акустического каротажа, сейсмической разведки и др. [Dvorkin et al., 2003]. В статье представлены результаты изучения влияния импульсной амплитуды и аксиального давления на скорость волны и затухание в цементированном песчанике в диапазоне килогерцовых частот. При изучении амплитудных эффектов мы переходим с ультразвуковых частот на более низкие акустические, часто используемые на практике. Эксперименты необходимы для оценки возможности перенесения «ультразвуковых эффектов» на реальные низкочастотные данные.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Эксперименты выполнены на образце искусственно приготовленного цементированного песчаника. Образец в виде стержня изготовлен из просеянного пляжного песка с диаметром зерен от 0.25 до 2.0 мм и цемента. Длина стержня составляет 1 м, он имеет форму цилиндра диаметром 76 мм. Плотность породы 2.0 г·см⁻³, пористость около 30 %. Скорость распространения волны находится в пределах 2230—2360 м/с. Испытания проводились при комнатной температуре на четырех фиксированных величинах аксиального статического давления: 0.25, 0.5, 0.75 и 1.0 МПа.

Измерительная установка состоит из следующих элементов [Егоров, 2004, 2005, 2007]. На одном торце образца расположен излучатель и рядом с ним приемник импульсных акустических сигналов первого измерительного канала регистратора. Излучатель и приемник состоят из набора пьезокерамических шайб (ЦТБС-3). Эта приемоизлучающая пара жестко контактирует с образцом через тонкий (4 мм) промежуточный слой из алюминия. Все контактирующие поверхности связаны между собой с помощью эпоксидной смолы. На другом торце образца таким же образом жестко закреплена латунная шайба толщиной 30 мм, к которой через эпоксидную смолу прикреплен аналогичный пьезокерамический приемник второго канала. Вся эта конструкция через домкрат вместе с динамометром вставлена в проем стены для обеспечения жесткого нагружения образца вдоль его оси.

Излучение акустического импульса осуществляется подачей от генератора прямоугольного электрического импульса амплитудой 10—60 В на пьезокерамику. Излучающий импульс продольных колебаний (рис. 1, спектры Фурье) с преобладающей частотой 6.8 кГц регистрируется приемником первого канала (1). Импульс, прошедший через образец, регистрируется как проходящий импульс приемником второго канала (2). Оба канала являются идентичными и имеют предварительные усилители, через которые сигналы поступают на цифровое регистрирующее устройство. Время квантования АЦП регистра-

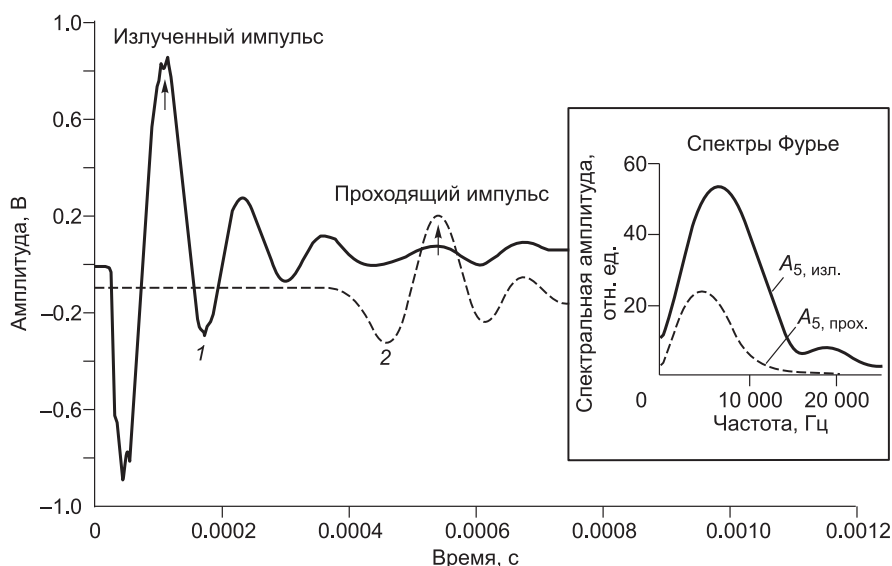


Рис. 1. Типичные импульсы излученного и проходящего сигналов; спектры Фурье.

Пояснение см. в тексте.

тора составляет 1 мкс. Согласно условию тонкого стержня, где $R/\lambda \sim 0.1$ (R — радиус стержня, λ — длина волны), в нем распространяется продольная нормальная волна со стержневой скоростью (далее для краткости просто продольная волна). Скорость волны вычислялась, используя время распространения максимума импульса при прохождении им однократного пути вдоль стержня. Точность измерения скорости волны составляет 0.1 %. Относительная точность измерения, определяемая при вариации амплитуды и постоянстве остальных условий (давления, температуры), намного выше.

Затухание (инверсная добротность) вычислялось из соотношения [Winkler, Plona, 1982]

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

где α — коэффициент поглощения (дБ/м¹), v_e — скорость распространения волны (м/с¹) и f — частота (Гц). Величина α вычисляется по формуле

$$\alpha(f) = \frac{8.686}{L} \ln \left[\frac{A_{\text{изл.}}(f)}{A_{\text{прох.}}(f)} K(f) \right], \quad (2)$$

где L — пройденный волной путь от источника до приемника (м), равный длине образца; $A_{\text{изл.}}(f)$, $A_{\text{прох.}}(f)$ — амплитуда Фурье излученного и проходящего импульсов соответственно; $K(f)$ — коэффициент, учитывающий отражение и преломление на границах раздела. При расчете величины Q_e^{-1} мы принимали $K(f) = 1$, так как невозможно точно учесть все нюансы, связанные с отражением и преломлением сигнала. Поэтому поведение Q_e^{-1} с амплитудой и давлением носит только качественный характер, что вполне удовлетворяет поставленным целям исследования.

Методика эксперимента состояла в следующем. Во-первых, изучалось поведение v_e и Q_e^{-1} при изменении величины амплитуды, когда аксиальное давление в образце является постоянным. Во-вторых, было исследовано изменение этих параметров в зависимости от величины аксиального давления на каждом постоянном уровне амплитуды импульса. Использовались четыре уровня аксиального давления: 0.25, 0.5, 0.75 и 1.0 МПа. На каждом уровне проводилась серия измерений скорости волны и затухания, в которой амплитуда сначала дискретно увеличивалась от минимальной величины до максимальной, а затем в обратном порядке уменьшалась до исходной величины. Получался целый ряд измерений на амплитудах A_1^e , A_2^e и т.д., которым соответствуют относительные деформации: $\varepsilon_{\min} = \varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2 \rightarrow \dots \rightarrow \varepsilon_{\max} = \varepsilon_7 \rightarrow \varepsilon_1$. Величины относительных деформаций в амплитудах импульса следующие: $\varepsilon_1 = 0.2\mu$, $\varepsilon_2 = 0.4\mu$, $\varepsilon_3 = 0.8\mu$, $\varepsilon_4 = 1.2\mu$, $\varepsilon_5 = 1.6\mu$, $\varepsilon_6 = 2.0\mu$, $\varepsilon_7 = 2.4\mu$, где $\mu = 10^{-6}$ (микродоформация). Амплитуда деформации в импульсе оценивалась по формуле: $\varepsilon = v/v_e = 2\pi u/\lambda$, где v — скорость частиц, v_e — скорость распространения волны, u — величина смещения частиц, которая вычислялась через ко-

эффицент преобразования пьезокристалла, λ — длина волны. Для построения амплитудно-зависимых графиков использовалась нормированная амплитуда $A^\varepsilon / (A_{\min}^\varepsilon = A_1^\varepsilon)$, где $A_{\min}^\varepsilon = A_1^\varepsilon = \varepsilon_1 \approx 0.2 \cdot 10^{-6}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При распространении акустического импульса в песчаном стержне происходит затухание сигнала и преобразование его частотного спектра. Типичные трассы акустических сигналов представлены на рис. 1. На врезке этого рисунка показаны спектры излученного и проходящего импульсов для одной из множества пар трасс. Импульсы имеют довольно простую форму с преобладающей энергией в первом периоде. Спектральный максимум излученного и проходящего импульсов находится на частотах 6835 и 4394 Гц соответственно. Прохождение импульса через породу приводит к понижению амплитудного максимума спектра и уменьшению преобладающей частоты импульса. Изменение максимума спектра проходящей волны в зависимости от величины аксиального давления на семи импульсных амплитудах показано на рис. 2. Поведение максимума с изменением давления имеет нелинейный характер и зависит от величины амплитуды.

Зависимость скорости продольной волны от нормированной амплитуды деформации представлена на рис. 3. Четыре графика амплитудной зависимости получены для четырех величин аксиальных давлений. Скорость волны слабо зависит от амплитуды. Имеется небольшое (до 0.8 %) увеличение v_e в области малой амплитуды при 0.75 МПа. В остальных случаях изменение скорости волны от амплитуды не намного выше погрешности измерения. Таким образом, влияние амплитуды на скорость волны является незначительным. Изменение скорости волны с увеличением аксиального давления на семи импульсных амплитудах показано на рис. 4. Скорость волны нелинейно увеличивается с давлением. При малом и высоком давлении изменение скорости примерно одинаковое и составляет около 1 %, а в интервале 0.5—0.75 МПа оно в три раза выше (~3.5 %).

Затухание проходящей волны в зависимости от амплитуды $Q_e^{-1}(A^\varepsilon) | P_n = \text{const}$ на четырех уровнях постоянного давления P_n показано на рис. 5. Q_e^{-1} с увеличением амплитуды возрастает (до 2.5 %) по линейному закону в диапазоне малых давлений. При более высоких давлениях затухание Q_e^{-1} практически не зависит от амплитуды. Нелинейное изменение затухания в зависимости от аксиального давления на семи уровнях постоянной амплитуды $Q_e^{-1}(P) | A_n^\varepsilon = \text{const}$ представлено на рис. 6. Характер поведения Q_e^{-1} с давлением на всех амплитудах является качественно одинаковым. Затухание с увеличением давления падает. Однако при давлениях 0.5—0.75 МПа уменьшение затухания Q_e^{-1} во много раз превышает

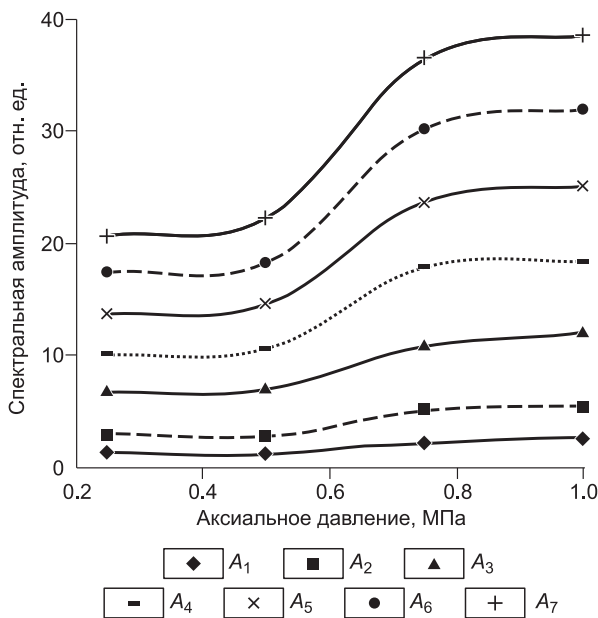


Рис. 2. Изменение величины спектрального максимума проходящего импульса в зависимости от аксиального давления на семи амплитудных величинах (A_1 — A_7).

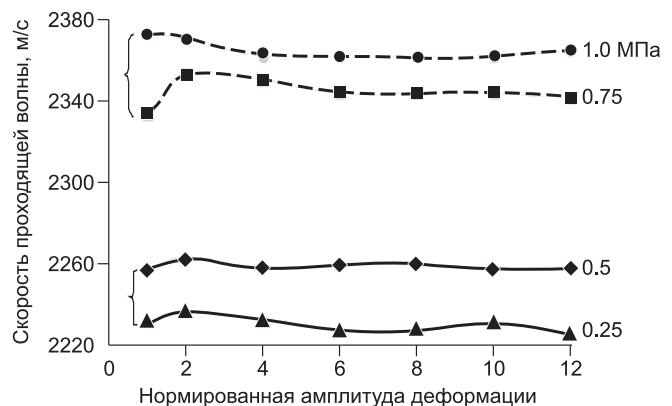


Рис. 3. Скорость проходящей волны в зависимости от нормированной амплитуды (здесь и далее $A^\varepsilon / (A_{\min}^\varepsilon = A_1^\varepsilon)$, где $A_{\min}^\varepsilon = A_1^\varepsilon \approx 0.2 \cdot 10^{-6}$) для четырех величин аксиального давления.

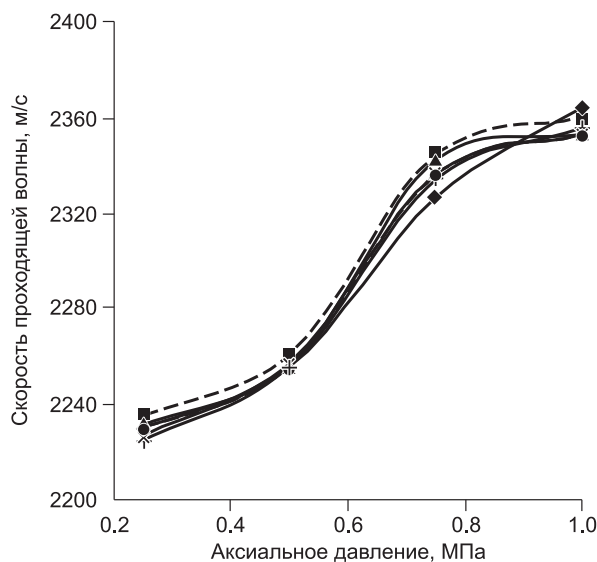


Рис. 4. Скорость проходящей волны в зависимости от аксиального давления на семи амплитудных величинах.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

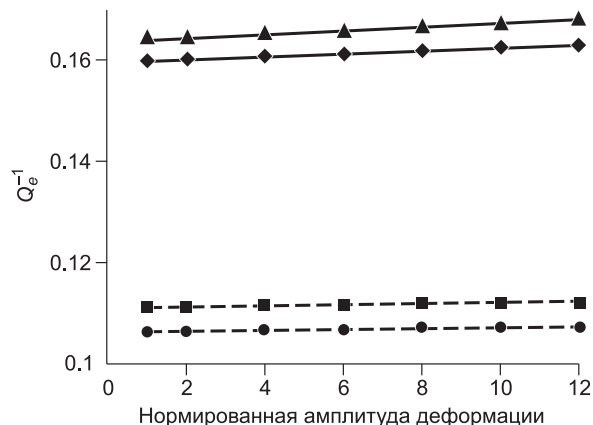


Рис. 5. Затухание проходящей волны в зависимости от нормированной амплитуды для четырех величин аксиального давления.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

его изменение на остальных участках. При 0.25—0.5 МПа амплитудные прямые затухания являются преимущественно параллельными (см. рис. 6).

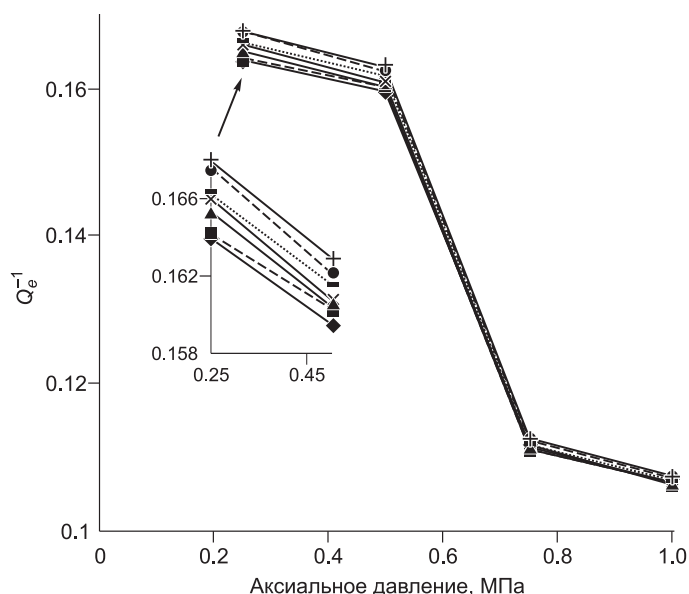
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на множество публикаций, посвященных изучению амплитудной зависимости упругих параметров, имеется определенный пробел в этой области. Большинство данных получено резонансным методом с использованием стоячих волн на килгерцовых частотах [Winkler et al., 1979; Winkler, Plona, 1982; Winkler, 1985; Ten Cate, Shankland, 1996; Johnson et al., 1996; Zinszner et al., 1997; Van Den Abeele et al., 1997; Ostrovsky, Johnson, 2001]. Однако, как показывают некоторые эксперименты, выводы на основании этих данных не всегда могут быть действительны для распространения импульсного сигнала. Но импульсные данные охватывают в основном диапазон ультразвуковых частот [Stewart et al., 1983; Машинский, 2006; Mashinskii, 2004; 2005a, 2006, 2007, 2008] и частично сейсмические частоты [Машинский и др., 1999; Машинский, 2003, 2007]. Представленные в работе данные заполняют определенную нишу распространения импульсного сигнала килгерцового частотного диапазона в среде, находящейся в напряженном состоянии.

В работе получено качественное подтверждение характера амплитудной зависимости при различном напряженном состоянии. Влияние переменной амплитуды на скорость волны является более слабым по сравнению с параметром затухания. Это наблюдается во всем диапазоне амплитуд и дав-

Рис. 6. Зависимость затухания проходящей волны от величины аксиального давления на семи амплитудных величинах.

Усл. обозн. см. на рис. 2.



лений. Характер амплитудной зависимости скорости волны и затухания, по нашим данным, качественно совпадает с результатами резонансных экспериментов. Скорость волны уменьшается, а затухание возрастает. Однако линейность амплитудной характеристики затухания в сцементированном песчанике представляет интересную информацию для размышления. Напомним, что аналогичные зависимости затухания Q^{-1} для природных песчаников являются нелинейными [Mashinskii, 2005a, 2006, 2007]. Линейность амплитудной зависимости затухания является признаком линейно-неупругого материала. Нелинейность аналогичной характеристики природного песчаника характерна для нелинейно-неупругого материала. Грубое различие между ними находится в состоянии межзеренных связей. Жесткие цементационные связи искусственного песчаника обладают меньшей дефектностью, чем природные, и тем самым обеспечивают повышенную упругость. Понятие степени упругости и неупругости подразумевает соотношение величины вклада упругой и неупругой (вязкоупругой и микропластической) компонент в общую деформацию [Mashinskii, 2005b]. При этом упругость и неупругость как линейность с нелинейностью могут проявляться одновременно. В природном песчанике сложные по строению межзеренные связи являются сильным источником неупругости на мезоуровне и определяют нелинейный характер затухания [Mashinskii, 2005a, 2006, 2007]. Таким образом, наши данные поддерживают известное положение об определяющей роли межзеренных связей на характер затухания. Вместе с тем микродефектность зерен может тоже являться источником неупругости и приводить к нелинейности характеристик затухания, в том числе и их релаксационных спектров [Mashinskii, 2008].

Следует обратить внимание на интервал давления 0.5—0.75 МПа, который является аномальным в количественном отношении. При равномерном увеличении нагрузки на образец изменение затухания здесь много больше, чем на других участках. То же самое аномальное поведение имеет место для скорости волны именно в этом интервале давления. Причина этого может быть связана с особенностями строения песчаника. В принципе существование такого «перелома» в скоростной характеристике является возможным, поскольку скорость волны и затухание взаимосвязаны между собой. Так, в эксперименте на стоячих волнах с сухим песчаником [Zinszner et al., 1997] также наблюдалось аномальное изменение декремента затухания в районе 1 МПа. Результаты этой работы подтверждают повторные измерения, проведенные через год на том же самом образце с той же методикой.

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлены характерные амплитудные зависимости скорости и затухания при распространении импульсного сигнала килогерцового частотного диапазона в песчаном образце, находящемся под давлением. Искусственный песчаник сочетает в себе линейно-нелинейные неупругие свойства. В диапазоне переменных амплитуд и давлений имеет место слабая зависимость скорости v_e и большая зависимость затухания Q_e^{-1} от амплитуды. Затухание Q_e^{-1} с увеличением амплитуды возрастает. Для различных амплитуд установлено нелинейное уменьшение параметра затухания с увеличением давления. Полученные результаты носят качественный характер.

Амплитудные характеристики затухания качественно согласуются с данными резонансного метода [Johnson et al., 1996; Ostrovsky, Johnson, 2001] и дополнены введением фактора давления. Результаты укрепляют позицию применимости классической теории амплитудной зависимости сейсмических параметров только для искусственных (идеализированных), а не реальных сред. В дальнейшем следует изучить поведение затухания в переменном амплитудно-частотном диапазоне в условиях различного насыщения образца и давления.

ЛИТЕРАТУРА

Егоров Г.В. Нелинейное взаимодействие продольных сейсмических волн в пористых флюидонасыщенных средах // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (5), с. 110—117.

Егоров Г.В. Нелинейные упругие эффекты в сухом и водонасыщенном пористом консолидированном образце // Физическая мезомеханика, 2004, т. 7, № 1, с. 57—61.

Егоров Г.В. Нелинейное возбуждение упругих волн в околоскважинном пространстве // Физическая мезомеханика, 2005, т. 8, № 1, с. 45—48.

Егоров Г.В. Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водонасыщенного образца в зависимости от степени газонасыщения // Физическая мезомеханика, 2007, т. 10, № 1, с. 107—110.

Машинский Э.И. Амплитудная зависимость скоростей сейсмических волн // Физика Земли, 2003, № 11, с. 1—7.

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 межскважинном 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—622.
- 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*. 2003, Z-99.
- 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.
- Mashinsky E.I.** Quasi-micro-plasticity processes and nonlinear seismicity // *Phys. Solid Earth*, 1994, № 30, p. 97—102.
- Mashinskii E.I.** The variants of the strain-amplitude dependence of elastic wave velocities in the rocks under pressure // *J. Geophys. Eng.*, 2004, v. 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*, 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.
- Mashinskii E.I.** Effect of Strain Amplitude on the Relaxation Spectra of Attenuation in the dry and saturated Sandstone under Pressure // *J. Geophys. Eng.*, 2007, № 4, p. 194—203.
- Mashinskii E.I.** Amplitude-frequency dependencies of Wave Attenuation in Single-Crystal Quartz: Experimental Study // *J. Geophys. Res.*, 2008, v. 113, B11304.
- Mavko G.M., Mukerji T., Dvorkin J.** *Rock Physics Handbook*. Cambridge, Cambridge University 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*. 2005, Z-99.
- Ostrovsky L.A., Johnson P.A.** Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // *La Rivista del Nuovo Cimento*, 2001, v. 24, № 4, 37 p.
- 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.
- Ten Cate J.A., Shankland T.J.** Slow dynamics in the nonlinear elastic response // *J. Geophys. Res.*, 1996, v. 23, № 21, p. 3019—3022.
- 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. 1994, p. 489—496.
- Van Den Abeele K.E.-A., Johnson P.A., Guyer R.A.** On the Quasi-Analytic Treatment of Hysteretic Nonlinear Response in Elastic Wave Propagation // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1997, v. 101, № 4, p. 1885—1898.
- 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.
- 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, v. B 102, p. 8105—8120.