



БИГАРМОНИЧЕСКИЕ ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ В ПОРИСТОМ ОБРАЗЦЕ ИСКУССТВЕННОГО ПЕСЧАНИКА ПРИ АКСИАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Г.В. Егоров, Э.И. Машинский

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

Приведены экспериментальные данные зависимости скоростей продольных и поперечных волн и их затухания в образце искусственного песчаника от величины аксиального давления в диапазоне 0,25–1,75 МПа. Рассмотрено, что с увеличением степени поджатия образца скорость продольных волн возрастает на 10 %, добротность (затухание уменьшается) в 1,8 раза, а скорость поперечных волн повышается на 7 % и добротность – в 1,3 раза. В спектральном представлении показаны возникающие в образце нелинейные эффекты при возбуждении его одновременно двумя продольными или двумя поперечными волнами близких частот в диапазоне до 10 кГц. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики пород и совершенствования сейсмоакустических методов.

Неупругость, дефектность, нелинейные сейсмические параметры, генерация высших гармоник

BIHARMONIC COMPRESSIONAL AND SHEAR WAVES IN THE POROUS SAMPLE OF ARTIFICIAL SANDSTONE UNDER AXIAL PRESSURE

G.V. Egorov, E.I. Mashinskii

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

Experimental dependences of P -, S -wave velocities and attenuation ($1/Q$) as a function of axial pressure in the artificial sandstone sample in (0,25–1,75) MPa range are presented. It is shown that with increasing pressure, the increase in V_P and in Q (attenuation decreases) on 10 % and in 1,8 times, respectively occurs. Shear wave velocity and the quality factor increase on 7 % and in 1,3 times, respectively. Nonlinear effects are detected in the sample when two compressional waves or two shear waves with near frequencies (in 10 kHz range) are generated simultaneously. These effects are shown in spectral expansion. Results can be used for rocks diagnostics and the improvement of seismic and acoustic methods.

Inelasticity, defectiveness, nonlinear seismic parameters, generation of higher harmonics

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотренные в статье эксперименты являются продолжением серии работ по изучению нелинейных упругих эффектов в сухих и водонасыщенных средах, проведенных как в условиях естественного залегания пород [1, 2], так и на физических моделях [3–6]. В этих работах изложены экспериментальные результаты исследования вариаций нелинейных упругих свойств пористых сред в зависимости от водо- и газонасыщения на основе нелинейного взаимодействия продольных волн. Нелинейные эффекты были также обнаружены при изучении амплитудной зависимости скоростей продольных волн в естественных условиях с источником импульсного типа [7]. Показано, что скорость волны с увеличением амплитуды не только уменьшается, но и возрастает с появлением гистерезиса. В лабораторных экспериментах на образцах пород при распространении импульсного сигнала продольных и поперечных колебаний установлено повышение скорости волны и уменьшение затухания при увеличении амплитуды [8, 9]. Были обнаружены также эффекты преобразования релаксационных спектров затухания, вызванные вариацией амплитуды, которые могут служить индикаторами флюидонасыщения по-

род [10, 11]. Значительное количество работ зарубежных исследователей посвящено изучению “неклассической” нелинейности горных пород на продольных волнах. Наиболее интересные результаты получены в работах [12–15], в которых приведены данные о нелинейных упругих эффектах, не укладывающихся в рамки классической теории нелинейности. В частности, на основе экспериментальных данных [15] доказывалось, что чувствительность нелинейных методов изучения структуры материалов и горных пород много выше классических линейных методов.

Необходимость изучения нелинейного взаимодействия сдвиговых волн, а также взаимодействия продольных и сдвиговых волн в различных средах является важной задачей [16]. В указанной ссылке содержится огромная библиография, посвященная обзору исследований нелинейных эффектов на продольных волнах в микронеоднородных средах. Метод двухчастотного излучения может служить не только эффективным инструментом при академическом изучении нелинейных эффектов в горных породах, но также применяться и для практических целей в геофизической разведке [17].

Отсутствие в настоящее время экспериментальных данных о нелинейных явлениях при двухчастотном распространении поперечных волн в пористых средах послужило предпосылкой для постановки оригинального эксперимента. В развитие нелинейного направления ставилась задача установления зависимости линейных и нелинейных упругих характеристик в образце искусственного песчаника от величины аксиального статического давления с использованием как продольных, так и поперечных волн.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились на специально изготовленном образце длиной 1 м, диаметром 76 мм, плотностью $1,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и пористостью 30 %. Образец был изготовлен из просеянного пляжного песка с размерами зерен от 0,25 до 2,0 мм и цемента. Схема экспериментальной установки, размещенной в проеме окна на подоконнике, изображена на рис. 1. С левой стороны образца расположен двухсекционный пьезо-керамический излучатель продольных волн И1, левая сторона которого эпоксидным клеем приклеена к стальной опорной массе ОМ (45 кг). Между правым концом излучателя и левым концом образца вставлен стандартный опорный подшипник ОП1, обоймы которого прикреплены к излучателю и образцу соответственно. Каждая из секций И1 возбуждается на своей частоте F1 и F2, создавая в образце бигармоническую плоскую волну (более подробно в [3]).

Правый конец образца через опорный подшипник ОП2 контактирует с излучателем поперечных волн И2, в качестве которого используется электродвигатель постоянного тока подходящего размера, ротор РОТ имеет две независимые идентичные обмотки. Левый конец ротора через специальный фланец эпоксидным клеем приклеен к правому торцу образца. Правая сторона статора СТ закреплена в подвижной опорной массе ПОМ (16 кг). Внутри статора расположены два постоянных магнита, в поле которых находится ротор с обмотками. Образец зажимается между излучателями И1 и И2 винтовым домкратом Д через мощную пружину (ПР), подвижную опорную массу ПОМ, статор электродвигателя СТ и опорный подшипник ОП2. Начальное усилие (примерно 0,25 МПа) создает условие подвешенного состояния, при котором отсутствуют какие-либо акустические контакты в образце, кроме торцевых. Величина осевого усилия контролируется по деформации предварительно тарированной пружины ПР с помощью линейки ЛИН, закрепленной левым концом на подвижной массе ПОМ. Развиваемое в образце осевое давление 0,25 МПа соответствует деформации пружины на 5 мм.

Для чистоты эксперимента мешающие высокочастотные “дребезги” в опорных подшипниках были устранены заменой шариковых сепараторов фторопластовыми элементами, обеспечивающими хорошее скольжение в подшипниках при отсутствии акустических помех. Бигармонические крутильные волны создаются в образце путем возбуждения каждой из обмоток ротора током своей частоты f1 и f2. Для измерения амплитуд колебаний вдоль образца с шагом 5 см приклеены контактные площадки КП из линолеума размером $10 \times 10 \times 3 \text{ мм}$. Измерение амплитуд продольных и поперечных колебаний осуществлялось двумя способами (см. рис. 1). Первый – с помощью пьезопластины ПЛ с приклеенной на ее конце иглой И, которая при измерениях внедряется в контактные площадки КП [3]. При измерении продольных колебаний ПЛ располагается перпендикулярно оси образца, а при измерении поперечных колебаний – вдоль его оси. В другом способе колебания регистрируются с помощью акселерометра (датчика ускорения – ДУ), который закрепляется в различных точках образца в соответствии с ориентацией измеряемых колебаний.

Корректность экспериментов по нелинейному взаимодействию в образце на поперечных и продольных волнах была обеспечена проверкой линейности аппаратуры (электронных усилителей, режима быстрого преобразования Фурье (БПФ) стандартного цифрового осциллографа “БОРДО”). Для этого на входы контролируемых устройств через пассивный сумматор подавалась сумма синусоид от двух независимых генераторов примерно такой же амплитуды, какая наблюдалась в эксперименте. При этом на выходах этих устройств регистрировались спектры выходных сигналов, в которых проверялось отсутствие комбинационных частот. Несомненной линейности аппаратуры подтверждает предел линейности используемых устройств, который на порядок превышает уровень регистрируемых в эксперименте сигналов. Полоса пропускания усилителей на уровне 0,7 составляла от 500 Гц до 6,5 кГц, а на уровне 0,5 – от 300 Гц до 9,0 кГц. БПФ осуществлялось в диапазоне до 10 кГц с подавлением нулевой гармоники.

В экспериментах по изучению нелинейного взаимодействия поперечных волн осуществлена серия измерений при различных частотах возбуждения и двух способах регистрации: а) с помощью иглы И с пластинчатым пьезопреобразователем ПЛ и б) с помощью датчиков ускорения ДУ. В некоторых случаях одновременно использовались игла и один из ДУ, а в других случаях – два ДУ, идентичность которых предварительно проверялась. Спектры, измеренные в одной точке образца иглой и акселерометром, отличались незначительно. Частоты возбуждения продоль-

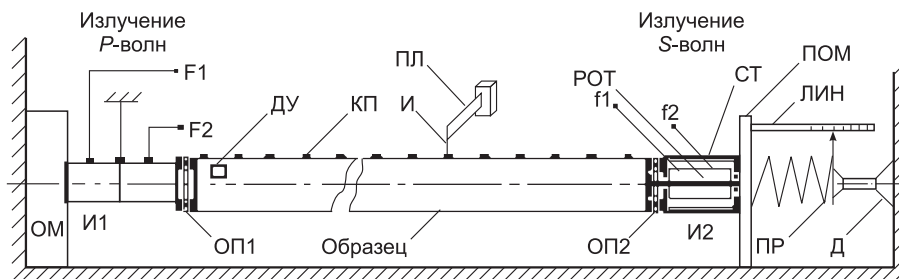


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Пояснения см. в тексте.

ных (F_1, F_2) и поперечных (f_1, f_2) волн выбирались так, чтобы в диапазон регистрации (от 300 Гц до 10 кГц), с одной стороны, попадали все возможные комбинационные частоты (разностная, суммарная и вторые гармоники основных частот), а с другой – на длине образца укладывалось бы более одной длины волны исходных сигналов возбуждения. Отметим, что если выбрать частоты возбуждения так, что их разность будет равна резонансной частоте образца, то амплитуда разностной частоты в регистрируемом спектре будет существенно превышать амплитуды остальных комбинационных частот. Этим обстоятельством также определяется выбор значений частот возбуждаемых волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сначала выполнялись предварительные операции, позволяющие убедиться в отсутствии заметных искажений в излучаемых И1 колебаниях после установки фторопластовых вставок в ОП1 и ОП2. Для этого с помощью иглы И регистрировался спектр колебаний И1 сначала слева, а затем справа от ОП1 при одновременном возбуждении на двух частотах $F_1 = 6055$ Гц и $F_2 = 7812$ Гц. Идентичность полученных спектров подтверждает, что фторопластовые вставки не вносят нелинейных искажений. Далее определялась резонансная частота первой моды продольных колебаний образца при возбуждении его одной из секций излучателя И1. Стоячая полуволна на резонансной частоте имеет узел колебаний в середине образца, а максимумы амплитуды вблизи его торцов. Резонансная частота равна 1706 Гц при среднем давлении 1,0 МПа. Скорость продольной (стержневой) волны составляет 2590 м/с [6], и на длине образца укладывается 2,5–3 длины волны.

Изучение зависимостей резонансных частот образца на продольных и поперечных волнах (F, f) и их затухания Q^{-1} (инверсной добротности) от величины аксиального давления проводилось следующим образом. Аксиальное давление (в дальнейшем – давление) изменялось в диапазоне (0,25–1,75) МПа с шагом 0,25 МПа. Начальное поджатие в 0,25 МПа принимается за условный нуль. При каждом значении давления определялись величины резонансных частот образца (F, f) и ширина полосы резонансной характе-

ристики на уровне 0,7. По этим данным вычислялось значение добротности образца Q как отношение резонансных частот к ширине полосы. Величина затухания определяется как Q^{-1} . Измерения проводились как при увеличении давления от минимума до максимума, так и обратном его уменьшении от максимума до минимума.

Зависимости резонансной частоты и затухания продольной волны от величины аксиального давления представлены на рис. 2, а. Резонансная частота продольных колебаний при семикратном росте давления увеличивается на 10 %, добротность образца возрастает в 1,8 раза, т. е. величина затухания уменьшается во столько же раз. Кривые резонансной частоты и затухания при увеличении и уменьшении давления не совпадают, что свидетельствует о гистерезисе. Величина гистерезиса на среднем давлении (1 МПа) по резонансной частоте продольной волны составляет 1,7 %, а по затуханию – 16 %. Важно отметить, что поведение скорости волны и затухания с давлением качественно соответствует поведению амплитудно-зависимых скоростей и затухания импульсного сигнала, полученного на образцах песчаника и кварца в ультразвуковом диапазоне частот [10, 11].

В экспериментах на поперечных волнах сначала определялась резонансная частота образца первой моды крутильных колебаний при возбуждении источником И2. При средней деформации пружины 15 мм эта частота равна 1040 Гц. Для определения чистоты крутильных колебаний два идентичных акселерометра закреплялись на окружности правого торца образца под углом 90° друг к другу. При возбуждении на частоте резонанса 1040 Гц установлено равенство амплитуд колебаний обоих акселерометров, т. е. сечение образца совершает крутильные колебания. Возбуждение достаточно чистой поперечной волны подтверждается также тем, что амплитуда в ДУ, ориентированном на регистрацию продольных колебаний, при возбуждении поперечных волн на порядок меньше, чем в ДУ, ориентированном на регистрацию крутильных колебаний.

На первой, второй и третьей модах крутильных колебаний с помощью иглы И, поочередно внедряемой в контактные площадки КП, определялось распределение амплитуды стоячих волн по длине образ-

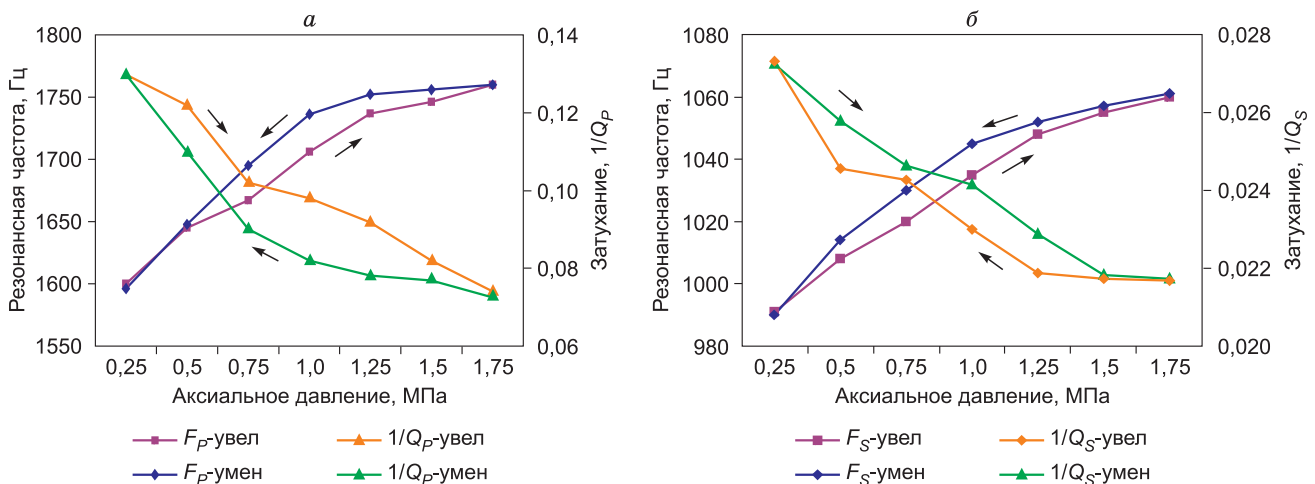


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты и затухания (инверсной добротности):

а – продольной волны; б – поперечной волны от аксиального давления.

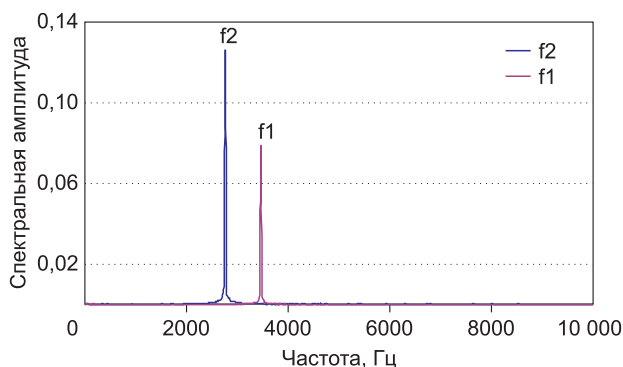


Рис. 3. Спектр сигнала возбуждения поперечной волны на частоте f_1 и f_2 .

ца. На первой моде форма стоячей волны, так же как и в случае продольной волны, имеет узел в центре образца и максимумы амплитуды на его концах. Это соответствует граничным условиям (для крутильных колебаний концы образца свободны, поэтому на его длине должно укладываться целое число полуволн). Определить достаточно точно длину стоячей волны на первой моде проблематично, так как трудно фиксировать положение максимумов. На второй и третьей модах крутильных колебаний длина стоячих волн с высокой точностью определяется по узлам, в которых происходит скачок фазы колебаний на 180° . Резонансная частота второй моды равна 1734 Гц, а узлы находятся в точках 22,5 и 73 см от левого конца образца. Заметим, что при абсолютно свободных концах они должны быть расположены в точках 25 и 75 см. По величине длины стоячей волны и резонансной частоте соответствующей моды вычисляется скорость поперечной волны в образце на данной частоте. На второй моде скорость волны равна 1751 м/с, т. е. в 1,5 раза меньше скорости продольной волны. На третьей моде колебаний резонансная частота соответствует 2670 Гц, узлы находятся в точках 16,7, 50 и 83,3 см от левого конца образца (при абсолютно свободных концах они должны быть именно в этих точках). Длина стоячей волны на третьей моде равна 0,66 м, скорость волны – 1778 м/с. Отсюда следует, что при увеличении частоты в 1,54 раза скорость поперечной волны в образце возрастает только на 1,5 %. Такая разница в скоростях, возможно, объясняется частотной дисперсией волн. Дело в том, что значение резонансной частоты в эксперименте определялось с погрешностью, не превышающей 0,2 %, а длина волны – с ошибкой не более 0,5 %.

Зависимость резонансной частоты и затухания крутильных колебаний от аксиального давления приведена на рис. 2, б. Чувствительность измеряемых параметров на поперечных волнах к изменению давления несколько иная, чем на продольных волнах в том же стрессовом диапазоне. Скорость поперечных волн здесь возрастает только на 7 %, а затухание уменьшается в 1,3 раза. Абсолютная величина добротности превосходит величину добротности на продольных волнах минимум в 3 раза, т. е. затухание поперечных волн намного меньше. Петли гистерезиса в обоих случаях имеют близкий характер. Резкое различие добротности образца на продольных и поперечных волнах объясняется, по-видимому, существенной разницей граничных условий на концах образца для продольных и поперечных волн. Потери энергии продольной волны

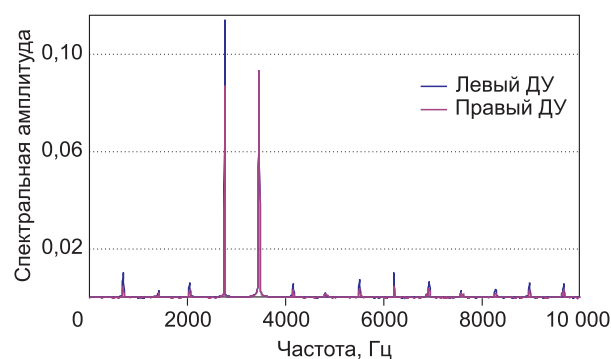


Рис. 4. Спектр комбинационных частот поперечной волны на левом (а) и правом (б) торцах образца.

на концах значительно больше, чем у поперечной волны, для которой граничные условия близки к абсолютно свободным. Для уточнения этого предположения необходимы специальные исследования.

На рис. 3 показаны спектры сигналов возбуждения поперечных волн, зарегистрированные ДУ на правом конце образца. Возбуждение осуществлялось поочередно на частотах $f_1 = 3457$ Гц и $f_2 = 2754$ Гц сигналами практически синусоидальной формы. В спектрах исходных сигналов f_1 и f_2 , кроме основных гармоник, какие-либо составляющие отсутствуют. На рис. 4 приведены спектры сигналов, зарегистрированные двумя ДУ на левом и правом концах образца при возбуждении одновременно двумя указанными выше частотами. В обоих спектрах, помимо основных частот, присутствует весь набор комбинационных частот. Это: 1) разностная частота $-F = 703$ Гц с амплитудами 5 и 10,2 мВ; 2) суммарная частота $+F = 6211$ Гц с амплитудами 5 и 10,6 мВ; 3) вторая гармоника $2f_1 = 6914$ Гц с амплитудами 4 и 6,9 мВ; 4) вторая гармоника $2f_2 = 5508$ Гц с амплитудами 3,9 и 7,7 мВ и 5) даже третья гармоника $3f_2 = 8262$ Гц с амплитудами 1,8 и 3,2 мВ. Кроме этого присутствуют следующие частоты с малыми амплитудами: $2(-F) = 1406$ Гц, $f_2 - (-F) = 2051$ Гц, $f_1 + (-F) = 4160$ Гц, $2f_2 - (-F) = 4805$ Гц, $2f_1 + (-F) = 7617$ Гц, $3f_2 + (-F) = 8965$ Гц и $3f_2 + 2(-F) = 9668$ Гц.

Исследование нелинейных характеристик образца на продольных волнах для большей корректности получаемых результатов проводилось с непосредственно приклеенным к левому торцу образца излучателя И1 (без левого ОП1). Резонансная частота образца при этом была равна 1600 Гц. На рис. 5 показан

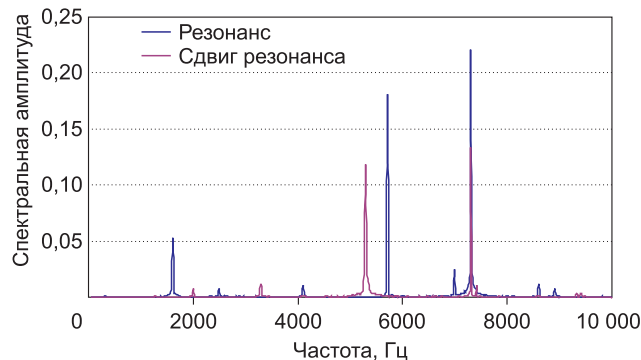


Рис. 5. Спектр комбинационных частот продольных колебаний на правом торце образца на резонансе и сдвиге от резонанса.

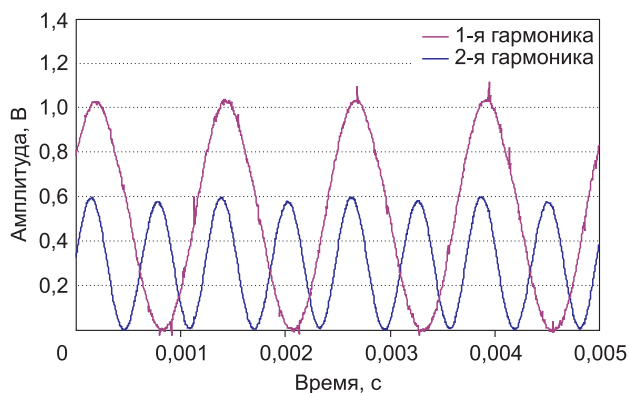


Рис. 6. Первая и вторая гармоники, зарегистрированные на расстоянии 0,8 м от излучателя продольных колебаний.

спектр, зарегистрированный ДУ, установленным на правом конце образца при одновременном возбуждении его слева на частотах $F_1 = 7305$ Гц и $F_2 = 5703$ Гц. Для примера эти частоты выбраны так, что их разностная частота совпадает с резонансной частотой образца. В этом спектре помимо F_1 и F_2 с амплитудами 221 и 181 мВ видны разностная частота $-F = 1602$ Гц с амплитудой 53 мВ. Также имеются некоторые другие комбинационные частоты: $F_2 - (-F) = 4102$ Гц, $F_2 - 2(-F) = 2500$ Гц, $F_1 + (-F) = 8907$ Гц и др. с существенно меньшими амплитудами, чем у разностной частоты. Сдвиг одной из частот возбуждения, например, F_2 до частоты 5293 Гц, приводит к несовпадению разностной частоты с резонансом образца и выравниванию амплитуд комбинационных частот. То же самое происходит при сдвиге F_2 в другую сторону от первоначального значения.

Степень нелинейности образца от изменяющегося статического давления на продольных и поперечных волнах имеет одинаковый характер. Установлено, что амплитуда разностной частоты как для поперечных, так и для продольных волн при изменении давления в вышеуказанном диапазоне имеет максимум при среднем значении давления 1,0 МПа и уменьшается при крайних значениях в 2,5 раза. Таким образом, эти зависимости являются значительно более сильными, чем аналогичные для скорости и затухания, приведенные на рис. 2, а, б, и поэтому требуют детального исследования.

Специально изучался эффект возникновения в образце второй гармоники при возбуждении его синусоидальным сигналом такой частоты, которая была бы в 2 раза меньше резонансной частоты образца на первой моде продольных колебаний. При возбуждении образца сигналом частотой 781 Гц в нем возникает стоячая волна на резонансе первой моды (1562 Гц). На рис. 6 продемонстрирован сигнал возбуждения, зарегистрированный иглой И на расстоянии 0,8 м от излучателя в полосе частот (0,5–9 кГц), и запись второй гармоники сигнала возбуждения, зарегистрированная через соответствующие резонансные фильтры (для подавления первой гармоники) датчиком ускорения ДУ в той же точке после усиления. На рис. 7 приведен спектр сигнала (см. рис. 6) и тот же спектр после увеличения амплитуды возбуждения в n раз. Увеличение амплитуды возбуждения в $n = 1,52$ раза вызывает рост амплитуды второй гармоники в 2,5 раза, что несколько больше, чем $n^2 = 2,31$.

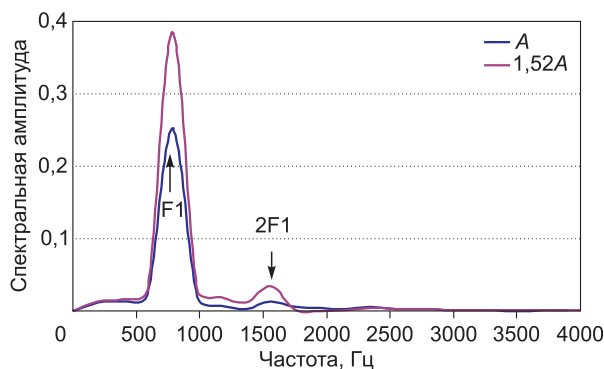


Рис. 7. Спектр гармонического сигнала на рис. 6 с величиной амплитуды возбуждения (A) и его спектр с амплитудой 1,52 A .

В соответствии с “классической” теорией нелинейности амплитуда второй гармоники должна возрастать пропорционально квадрату величины амплитуды первой гармоники. Здесь можно предположить проявление вклада “неклассической” нелинейности [12].

Изучена также зависимость амплитуды второй гармоники от изменяющегося статического давления, которая оказалась близко совпадающей с упомянутыми выше аналогичными зависимостями для амплитуд разностной частоты. В дальнейшем планируются эксперименты по детальному изучению зависимости степени нелинейности образца на поперечных волнах от изменяющегося статического давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные о зависимости величин затухания (инверсной добротности) и скорости продольных и поперечных волн от изменяющегося статического давления для искусственного песчаника, которые могут быть полезны при изучении напряженного состояния горных пород. Уменьшение величины затухания с ростом давления качественно соответствует полученному ранее результату при распространении импульсного сигнала с переменной амплитудой.

Результаты показывают, что в пористом песчанике нелинейные эффекты проявляются на поперечных волнах не менее ярко, чем на продольных волнах, и требуют дальнейшего тщательного исследования. Представляет интерес детальное изучение влияния статического давления на весь спектр комбинационных частот, а не только на разностную частоту продольных и поперечных волн.

Полученные результаты подтверждают данные других исследований [15] о том, что вариации напряженного состояния горных пород в большей степени характеризуются изменениями их нелинейных свойств, чем изменениями скоростей волн (или упругих модулей).

Принципиально новые перспективы открываются при использовании нелинейных эффектов для изучения пород в окоскважинном и межскважинном пространствах с использованием поперечных и продольных волн.

Пока остается неизвестным, какие эффекты происходят при нелинейном взаимодействии в горных породах продольных и поперечных волн между собой.

Сам факт такого взаимодействия в рамках вышеописанных экспериментов нами был зафиксирован. Дальнейшие исследования в указанном направлении необходимо осуществить не на искусственно созданных материалах, а на образцах натуральных горных пород или в их естественном состоянии.

Авторы выражают искреннюю благодарность своим коллегам В.М. Носову и С.С. Полозову за бескорыстную и эффективную помощь в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 09-05-00405 и 10-05-00690.

Литература

1. **Егоров Г.В.** Нелинейное взаимодействие продольных сейсмических волн в пористых флюидонасыщенных средах // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 5. С. 110–117.
2. **Егоров Г.В., Носов В.М., Маньковский В.В.** Экспериментальная оценка нелинейных упругих параметров сухой и флюидонасыщенной пористой среды // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 457–464.
3. **Егоров Г.В.** Нелинейные упругие эффекты в сухом и водонасыщенном пористом консолидированном образце // Физ. мезомех. 2004. Т. 7, № 1. С. 57–61.
4. **Егоров Г.В.** Нелинейное возбуждение упругих волн в околоскважинном пространстве // Физ. мезомех. 2005. Т. 8, № 1. С. 45–48.
5. **Егоров Г.В.** Экспериментальное измерение величины упругой нелинейности пористой среды при ее насыщении газом // Физ. мезомех. 2006. Т. 9, № 1. С. 77–80.
6. **Егоров Г.В.** Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водонасыщенного образца в зависимости от степени газонасыщения // Физ. мезомех. 2007. Т. 10, № 1. С. 107–110.
7. **Машинский Э.И.** Амплитудно-зависимые эффекты при распространении продольной сейсмической волны в межскважинном пространстве // Физика Земли. 2007. Т. 43, № 8. С. 683–690.
8. **Машинский Э.И.** Амплитудная зависимость скоростей сейсмических волн // Физика Земли. 2003. № 11. С. 1–7.
9. **Машинский Э.И., Егоров Г.В.** Амплитудно-зависимые эффекты в проходящей волне в цементированном песчанике под давлением // Геология и геофизика. 2011. (В печати).
10. **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. N 4. P. 194–203.
11. **Mashinskii E.I.** Amplitude-frequency dependencies of Wave Attenuation in Single-Crystal Quartz: Experimental Study // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. B11304.
12. **Scalerandi M., Agostini V., Delsanto P.P., van Den Abeele K., Johnson P.A.** Local interaction simulation approach to modeling nonclassical, nonlinear elastic behavior in solids // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 113, N 6. P. 1–11.
13. **TenCate J.A., Shankland T.J.** Slow Dynamics and nonlinear response at Low Strains in Berea Sandstone // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 3019–3022.
14. **TenCate J.A., Smith E., Guyer R.A.** Universal Slow Dynamics in Granular Solids // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 1020–1023.
15. **Van Den Abeele K., Sutin A., Carmeliet J., Johnson P.A.** Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) // NTD & E. International. 2001. V. 34. P. 230–248.
16. **Назаров В.Е., Радостин А.В.** Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. Н. Новгород, 2007. 254 с.
17. **Johnson P.A., Shankland T.J., O'Connell R.J., Albright J.N.** Nonlinear generation of elastic waves in crystalline rock // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N 5. P. 3597–3602.