

УДК 550.834

**АНОМАЛИИ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ  
ВОЛН В ОБРАЗЦЕ ПРИРОДНОГО ПЕСЧАНИКА,  
СОСТАВЛЕННОГО ИЗ БЛОКОВ**

**Э. И. Машинский, Г. В. Егоров**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
E-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru,  
проспект акад. Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Изучены скорости  $P$ - и  $S$ -волн в образце природного песчаника, находящегося под аксиальным давлением. Образец керна цилиндрической формы длиной 1 м и диаметром 0.08 м составлен из блоков разных размеров. Обнаружено аномальное поведение скоростей продольных и поперечных волн (4–6 кГц) при измерениях на базе всего образца, его отдельных блоков и в областях контакта между ними. Скорости волн на всем образце значительно меньше, чем в блоках. Межблочные контакты вызывают задержку времени и уменьшение скоростей волн. С уменьшением базы измерения вблизи контакта скорости нелинейно уменьшаются до аномально низких значений (сотни м/с). С увеличением давления на образец скорости  $V_P$  и  $V_S$  нелинейно возрастают, а задержка времени уменьшается. На зависимости  $(V_P / V_S)(P)$  имеется пик (около 1 МПа), который проявляется как в отдельных блоках, так и в целом образце. Аномальное поведение скоростей  $V_P$  и  $V_S$  предположительно можно объяснить влиянием неупругих процессов на микроконтактах блочной среды при распространении в ней акустических волн.

*Микронеоднородные блочные среды, неупругость, нелинейность, скорости продольных и поперечных волн, трещиноватость, геостатическое давление*

**ВВЕДЕНИЕ**

Массивы горных пород имеют неоднородное блочно-иерархическое строение, которое оказывает влияние на характеристики распространяющихся в них акустических и сейсмических волн [1, 2]. Масштабы блочной структуры простираются от размеров кристаллических зерен до блоков горного массива, разделенных разной величины разломами. Как зерна, так и блоки связаны между собой различными пленками и прослойками, обладающими существенно более слабыми механическими свойствами и аномальными неупругими характеристиками.

Большое количество работ посвящено изучению скоростей упругих волн в различных горных породах на акустических и сейсмических частотах и постоянной амплитуде в лабораторных и натуральных условиях. Сравнительно меньше работ выполнено при изучении скоростей волн с переменной амплитудой импульсного сигнала. Для примера можно привести изучение амплитудной зависимости скоростей волн на образцах пород и в натуральных условиях, которые показывают существенное и разнознаковое изменение этого параметра [3–5]. Скорости волн могут как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от величины амплитуды.

Последнее время интенсивно ведутся теоретические и экспериментальные работы по изучению распространения упругих волн в породах с блочным строением [6]. В качестве механической модели среды используется система стержней, связанных пружинами [7–12]. В такой среде при импульсном воздействии распространяются волны маятникового типа ( $\mu$ -волны), которые вызваны движением отдельных блоков как “абсолютно твердых тел”. Поскольку в маятниковом приближении блоки считаются несжимаемыми, все деформации и смещения происходят за счет сжимаемости этих прослоек. Низкочастотные волны по сравнению с высокочастотным волновым пакетом распространяются со значительно меньшей скоростью, чем волны в отдельных блоках.

Приводятся результаты экспериментов по распространению акустических волн при импульсном возбуждении в образце природного песчаника, составленного из отдельных блоков одного и того же зерна. Изучение скоростей волн проведено при действии источников сжатия – растяжения и крутильных (сдвиговых) колебаний.

### МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения скоростей волн использовали цилиндрический образец длиной 1055 мм, диаметром 76 мм, составленный из семи блоков зерна разной длины (от 90 до 216 мм). Зерн извлекали из одной скважины с глубины 2747–2754 м. Он представлен кварцево-полевошпатовым среднезернистым глинистым крепким песчаником с линзовидной, местами волнистой слоистостью. Присутствовали также включения растительного детрита, образующие нитевидные слои. Проведено детальное исследование поведения скоростей продольных и поперечных волн в образце на малой базе измерения (блок, межблоковый контакт) и большой базе (1 м) в условиях аксиального давления и комнатной температуры.

Схема экспериментальной лабораторной установки представлена на рис. 1. Установка размещена в проеме капитальной стены на жестком основании. Блоки, из которых составлен образец, промаркированы и обозначены для их идентификации. Торцы блоков предварительно отшлифованы по плоскостям, перпендикулярным их оси, что необходимо для обеспечения хорошего контакта и поперечной устойчивости образца при осевой нагрузке. Контакт между блоками не виден при облучении его на просвет. Никакие способы для его улучшения (склеивание и т. д.) не использованы. При сборке образца приняты специальные меры для обеспечения осевого центрирования. Скорости продольной и поперечной волн для каждого из блоков приведены в таблице.

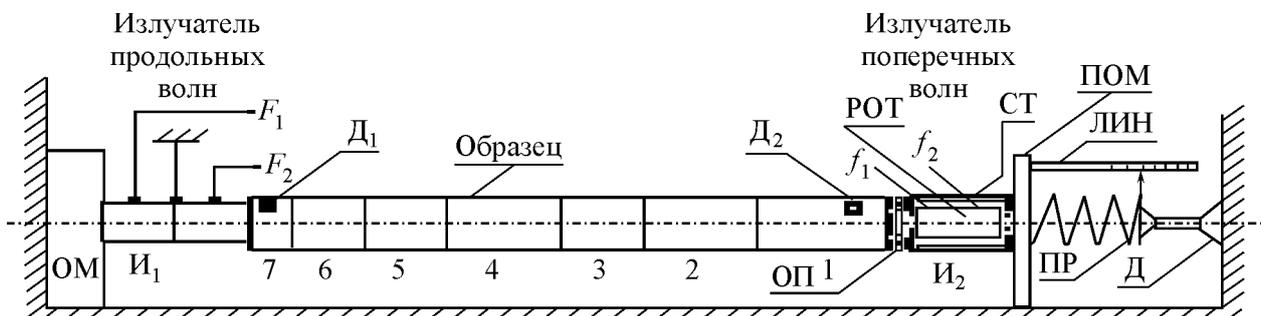


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (обозначения в тексте)

### Упругие характеристики блоков и образца в целом

Номер блока	1	2	3	4	5	6	7	$V_{cp}$	$V_{об}$
$V_P$ , м/с	2860	2760	2640	2830	2550	2660	2700	2714	2350
$V_S$ , м/с	2050	2050	2080	2040	2080	2050	2120	2067	1820

Двухсекционный пьезокерамический излучатель продольных колебаний  $I_1$  находится на левом торце образца. Левая сторона излучателя приклеена к стальной опорной массе ОМ (размеры  $275 \times 280 \times 85$  мм, масса 45 кг) с помощью эпоксидного клея. Каждая из секций  $I_1$  может возбуждаться как синусоидальными (на частотах  $F_1$  и  $F_2$ ), так и импульсными сигналами, создавая в образце соответствующей формы плоские волны (более подробно об излучателе написано в [13]). Правый конец образца через опорный подшипник ОП контактирует с излучателем поперечных волн  $I_2$ . В качестве  $I_2$  использован электродвигатель постоянного тока подходящего размера, ротор которого РОТ имеет две независимые идентичные обмотки. Левый конец ротора через специальный фланец приклеен эпоксидным клеем к правому торцу образца. Правая сторона статора СТ закреплена в подвижной опорной массе ПОМ (размеры  $275 \times 280 \times 30$  мм, масса 16 кг). Внутри статора расположены два постоянных магнита, в поле которых находится ротор с обмотками. Каждую из обмоток ротора можно возбуждать либо синусоидальными токами различных частот ( $f_1$  и  $f_2$ ), либо импульсными сигналами и тем самым создавать в образце плоские крутильные волны соответствующей формы.

Образец зажимается между излучателями  $I_1$  и  $I_2$  винтовым домкратом Д через мощную пружину ПР, подвижную опорную массу ПОМ, статор электродвигателя СТ и опорный подшипник ОП. Предварительное давление (примерно 0.25 МПа) создает условие нахождения образца в подвешенном состоянии и исключает какие-либо акустические контакты, кроме торцевых. Величина осевого усилия контролируется по деформации предварительно тарированной пружины ПР с помощью линейки ЛИН, закрепленной на подвижной массе ПОМ. В проведенном эксперименте давление изменялось в диапазоне от 0.25 до 1.75 МПа с шагом 0.25 МПа. Большинство измерений проведено при среднем давлении 1 МПа.

Возбуждение продольных волн осуществлялось импульсом напряжения прямоугольной формы длительностью 150 мкс, а возбуждение поперечных волн — импульсом тока, имеющим форму полусинусоиды длительностью 60 мкс. Преобладающая частота зарегистрированного в образце импульса составляет около 6 кГц для продольной волны и около 4 кГц для поперечной. Измерение амплитуд продольных и поперечных колебаний выполнялось двумя датчиками ускорения ДУ<sub>1</sub> и ДУ<sub>2</sub>, которые закреплялись в различных точках образца в соответствии с ориентацией измеряемых колебаний. Направление осевой чувствительности датчиков перпендикулярно большей стороне контактной площадки ( $15 \times 8$  мм). Полная идентичность датчиков получена при их установки вплотную друг к другу в одной точке образца.

В экспериментах выполняется условие возбуждения плоских волн, так как длина волны в образце на порядок больше его диаметра. В описании использован термин “продольные волны”, хотя на самом деле генерируются стержневые волны, которые по скорости несколько отличаются от скорости продольных волн, возникающих в бесконечной среде. Однако колебания частиц среды в стержневой и продольной волне совпадают и происходят деформации сжатия – растяжения, поэтому изучаемые в эксперименте волны обозначены как продольные.

Полоса пропускания усилителей на уровне 0.7 составляет от 600 Гц до 20 кГц. Измерение скоростей волн в блоках и между блоками (в области их контакта) осуществлялось установкой датчиков Д<sub>1</sub> и Д<sub>2</sub> в соответствующее положение и определением расстояния между центрами датчиков. Сигналы регистрировали цифровым осциллографом “Бордо”. Вычисление скоростей проводили, используя время пробега волны, определяемое по первому вступлению.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Скорости продольной и поперечной волн сначала измеряли во всем образце, а затем в каждом из зажатых в образце блоков при среднем давлении 1 МПа. При определении скоростей продольной и поперечной волны по образцу в целом измерялось время, когда датчик  $D_1$  устанавливался в точке “0”, расположенной на расстоянии 15 мм от левого торца образца, а датчик  $D_2$  в точке, находящейся на расстоянии 1.0 м от точки “0”. При измерении скоростей в блоках датчики  $D_1$  и  $D_2$  размещались на блоке слева и справа от контакта между блоками. В таблице приведены измеренные значения скорости продольных и поперечных волн в блоках. Указаны средние значения этих величин, полученные из множества повторных измерений. В крайнем правом столбце даны осредненные скорости по всему образцу. Видно, что скорости как продольных, так и поперечных волн в образце существенно меньше (примерно на 15 %) средних значений соответствующих скоростей в блоках. Детальное изучение процесса прохождения волн через контакты между блоками показало причину этого различия.

Изучение скоростей продольной и поперечной волны в области контакта между блоками проводилось на различной базе измерения, которая располагалась симметрично относительно контакта. При измерении скорости продольной волны сначала датчики  $D_1$  и  $D_2$  устанавливались слева и справа от контакта так, чтобы расстояние между центрами их контактных площадок равнялось 10 мм, а затем раздвигались симметрично относительно контакта на расстояние 20, 30 и 50 мм. Скорость волны определялась при каждом положении датчиков на четырех указанных интервалах установки. При измерении скорости поперечной волны датчики устанавливались по той же самой симметричной схеме, что и для продольных волн, т.е. слева и справа от контакта поочередно на расстоянии 20, 40, 60, 80 и 100 мм. Различие в выборе интервалов установки датчиков обусловлено их размерами. При ориентации чувствительности датчиков вдоль оси образца длина его контактной площадки составляет 8 мм (для продольной волны), а для регистрации поперечных волн (т. е. при их повороте на  $90^\circ$ ) — 15 мм.

На рис. 2 представлены скорости продольной и поперечной волны, измеренные в области контакта между блоками 4 и 5, в зависимости от измерительной базы. Скорости  $V_P$  и  $V_S$  нелинейно уменьшаются с уменьшением базы измерения (сплошные линии). Видно, что с уменьшением базы измерения имеется тенденция к сближению величин  $V_P$  и  $V_S$  (штриховые линии).

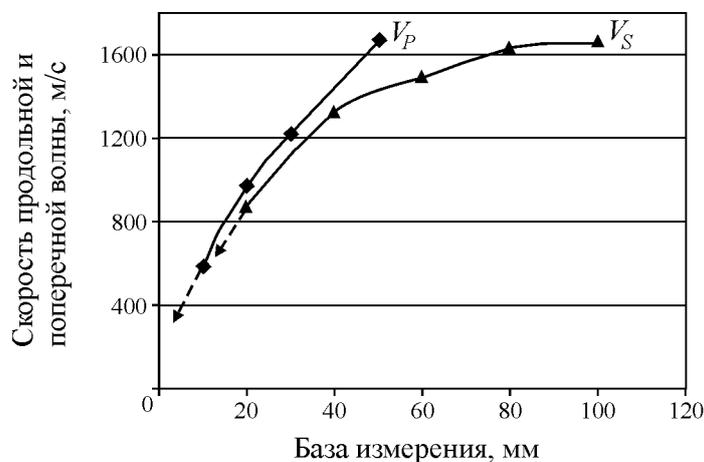


Рис. 2. Скорости продольной и поперечной волны, измеренные в области контакта между блоками 4 и 5, в зависимости от базы измерения

После прохождения волны через контакт отмечается задержка времени первого вступления волны, которую можно видеть на рис. 3. Здесь приведены акустические трассы продольной и поперечной волны для блоков 4 и 5, зарегистрированные на минимальной и максимальной базе измерения. Следует отметить, что указанные временные отрезки ( $\Delta t_P - 10$ ,  $\Delta t_P - 50$  и  $\Delta t_S - 20$ ,  $\Delta t_S - 100$ ) являются разницей между первыми вступлениями продольной и поперечной волны на базе измерения 10, 50 мм и 20, 100 мм до и после контакта соответственно. Общая задержка времени включает в себя и время прохождения волны в отсутствие контакта (в сплошном образце).

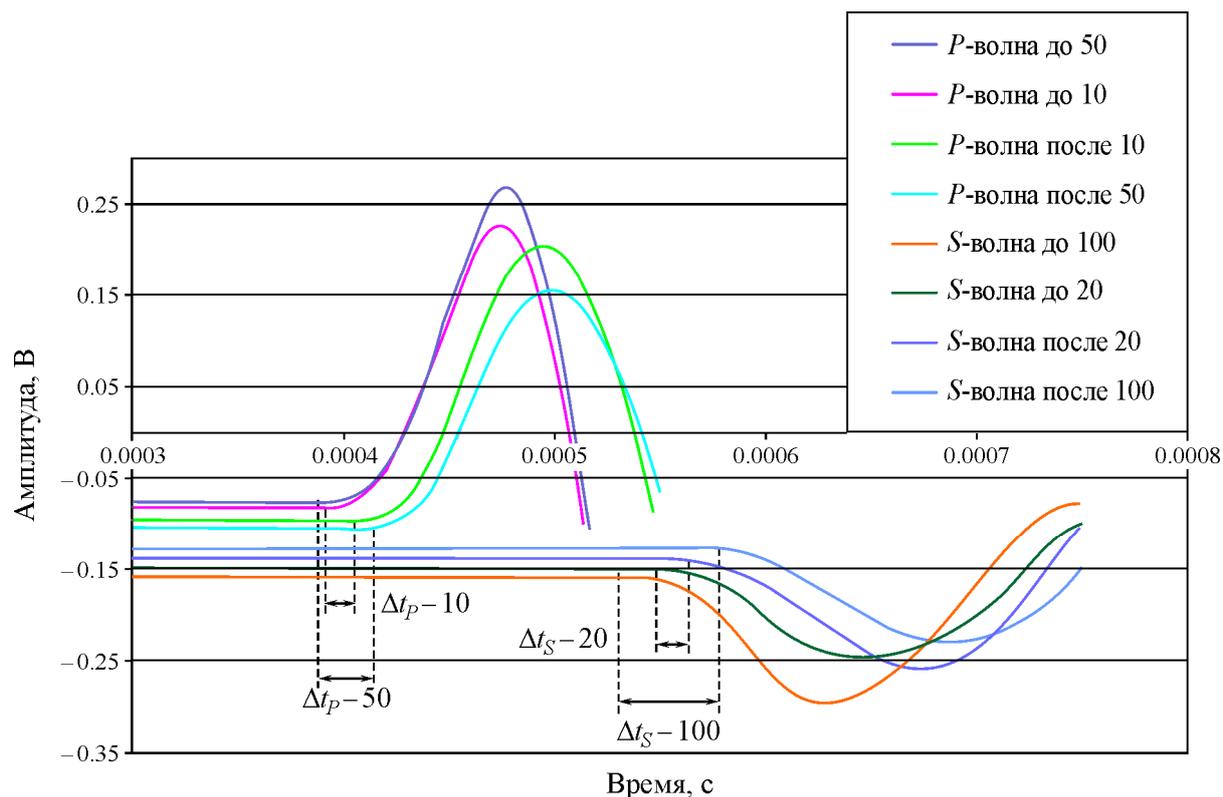


Рис. 3. Акустические трассы продольной и поперечной волны, зарегистрированные в области до и после контакта между блоками 4 и 5 для минимальной и максимальной базы измерения

Поведение скоростей продольных и поперечных волн в самом образце, в составляющих его блоках и контактной области между блоками в зависимости от аксиального давления изучено в диапазоне 0.25–1.75 МПа через каждые 0.25 МПа. На каждом значении давления положение установленных на образце датчиков оставалось неизменным.

Данные по изучению скоростей волн от давления для самого длинного блока 4, расположенного в середине образца, совместно с данными скоростей волн для образца в целом приведены рис. 4. Скорости  $V_P$  и  $V_S$  в обоих случаях нелинейно возрастают с увеличением аксиального давления. Отношение скоростей продольной и поперечной волны ( $V_P / V_S$ ) в зависимости от аксиального давления для блока 4 и образца в целом показаны на рис. 5. Эти зависимости имеют форму пика, который располагается на давлении 0.75–1.0 МПа. Изменение величины  $V_P / V_S$  с давлением в блоке 4 в 2 раза больше, чем в образце в целом.

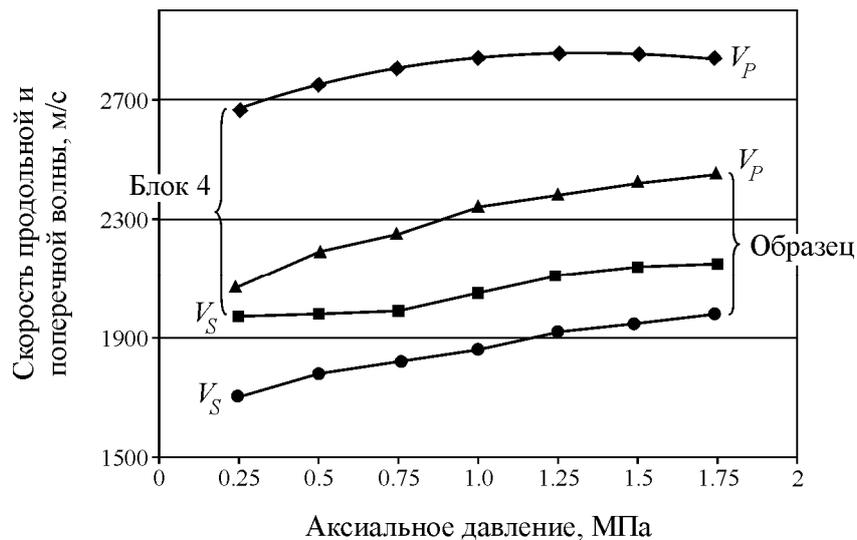


Рис. 4. Скорости продольной и поперечной волны в зависимости от аксиального давления в блоке 4 и в образце в целом

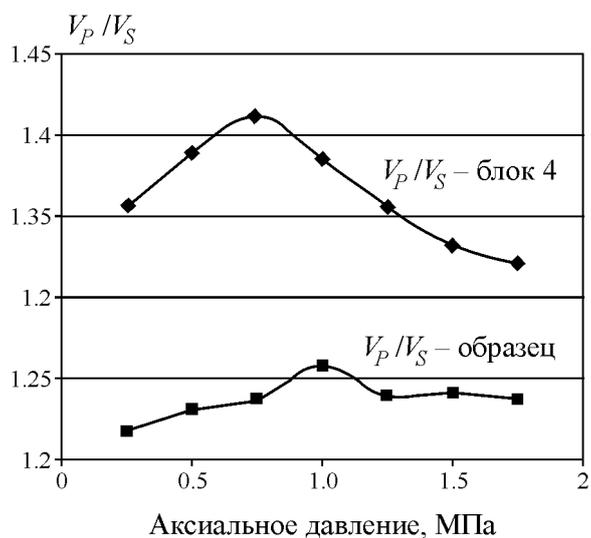


Рис. 5. Отношение скоростей продольной и поперечной волны в блоке 4 и в образце в целом в зависимости от аксиального давления

Зависимость времени задержки первого вступления в области контактов блоков от давления для продольной (база 10 мм) и поперечной (база 20 мм) волны представлена на рис. 6. С увеличением давления осредненная задержка времени  $\Delta t_P$  и  $\Delta t_S$  для  $P$ - и  $S$ -волн уменьшается. Имеется значительный разброс в задержке времени для разных контактов, но сохраняется сам характер зависимости от давления. Поэтому на рис. 6 показаны средние для всех контактов значения времен задержки.

Задержка времени при распространении продольных и поперечных волн в средах с разрывностями (например, с трещинами или слоистостью) была уже описана в работе [14]. В нашем эксперименте установлено, что задержка зависит от прикладываемого аксиального давления к образцу. Наличие соединений приводит к значительному понижению скорости волны. Эффект

задержки времени наблюдался также в полевом эксперименте при распространении продольной волны в слабо консолидированной породе [15, 16]. Этот эффект обусловлен микропластичностью породы и проявляется на малых деформациях в виде отставания времени первого вступления волны. В наших экспериментах в отличие от других исследований задержка времени и аномальное уменьшение скоростей волн детально изучены не только в самом образце, но и на малых базах измерения вблизи контактной области разрыва. Задержка времени может быть объяснена наличием неупругих процессов в области контакта между блоками. Сложное анизотропное строение образца (линзовидные включения, волнистая слоистость, нитевидные слои дендрита) также влияет на аномальный характер распространения волн.

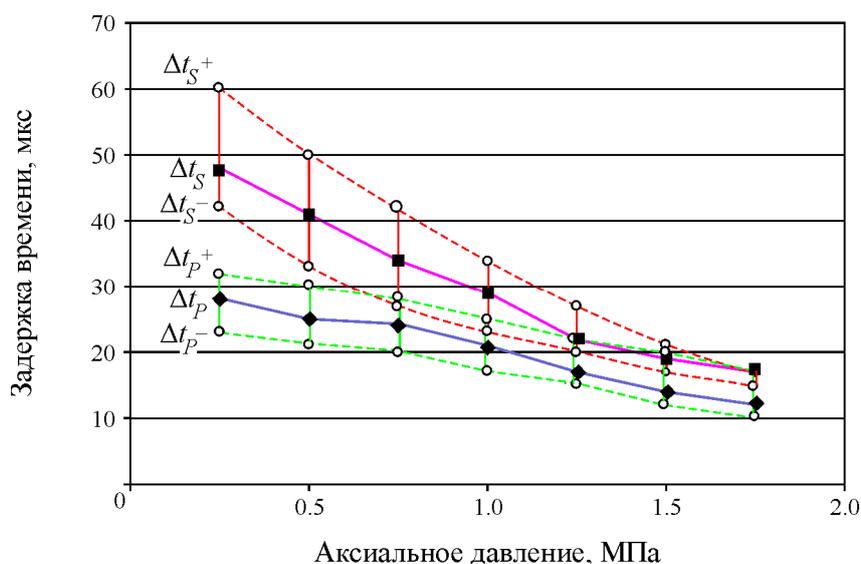


Рис. 6. Усредненная задержка времени первого вступления импульса продольной и поперечной волны на контактной области блоков в зависимости от величины аксиального давления

Аномальные значения отношения  $V_P / V_S$  в самих блоках и в целом образце являются необычным фактом. Причем в целом образце этот эффект проявляется в большей степени, что свидетельствует о сильном влиянии соединений на скорости волн. Вблизи соединения блоков происходит сближение скоростей продольной и поперечной волн. Однако увеличение давления на образец изменяет сцепление частиц на контакте блоков неоднозначным образом, что приводит к изменению значений  $V_P / V_S$  в сторону как увеличения, так и уменьшения. Аномальное значение  $V_P / V_S$  при расчете коэффициента Пуассона по формуле теории упругости дает отрицательное значение этого параметра. По-видимому, расчет коэффициента Пуассона для неупругой блочной среды по известным формулам не является корректным и требует совершенствования теоретического подхода.

Однако следует также отметить, что в редком случае отрицательное значение коэффициента Пуассона было получено при измерениях в Sioux кварците и Cosonino песчанике достаточно давно [17]. Имеются более свежие аналогичные результаты, например при изучении аномальной анизотропии парателлуриата ( $\text{TeO}_2$ ), в котором экспериментально зарегистрирован коэффициент Пуассона с отрицательным значением  $-0.15$  [18]. Теоретическое и экспериментальное обоснование аномального поведения коэффициента Пуассона в горной породе приведено в ра-

боте [19]. Повышенная нормальная сжимаемость дефектов может приводить к отрицательным значениям коэффициента Пуассона породы при достаточной концентрации дефектов. Это обнаружено для Weber песчаника при давлениях ниже 20 МПа. Полученные в наших экспериментах эффекты требуют дальнейшего экспериментального и теоретического изучения.

Эксперименты в составном блочном песчанике с совместным использованием продольных и поперечных волн позволили получить результаты, которые могут быть полезны при решении различных технологических задач, например связанных с прогнозом устойчивости кровли угольных выработок. Понимание механизма распространения волн через ослабленные механические контакты позволит создать методику и технические средства диагностики состояния среды для обнаружения “слабых мест” и предотвращения аварийных ситуаций.

### ВЫВОДЫ

Проведены исследования распространения продольных и поперечных волн в образце природного песчаника, составленного из притертых блоков, находящихся под аксиальным давлением. Изучены скорости волн во всем образце, в каждом из блоков и в области контакта между ними. Основные выводы сводятся к следующему.

1. Скорости продольных и поперечных волн в образце природного песчаника, составленного из блоков, по сравнению с соответствующими скоростями волн в отдельных блоках при неизменных внешних условиях являются аномально низкими.

2. В области контакта между блоками происходит задержка времени, скорости  $V_P$  и  $V_S$  нелинейно уменьшаются с уменьшением базы измерения, расположенной симметрично относительно контакта.

3. С увеличением аксиального давления скорости волн в образце и отдельных блоках нелинейно возрастают. Отношение  $V_P / V_S$  в диапазоне используемых давлений имеет максимум при давлении около 0.75 – 1 МПа.

Авторы выражают благодарность доктору физ.-мат. наук Б. П. Сибирякову за проявленный интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $v_\mu$  // ДАН СССР. — 1993. — Т. 333. — № 4.
2. Садовский М. А. Естественная кусковатость горных пород // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4.
3. Зайцев В. Ю., Матвеев Л. А. Амплитудно-зависимая диссипация в микронеоднородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью // Геология и геофизика. — 2006. — Т. 47. — № 5.
4. Машинский Э. И., Кокшаров В. З., Нефедкин Ю. А. Амплитудно-зависимые эффекты в диапазоне малых сейсмических деформаций // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40. — № 4.
5. Машинский Э. И. Амплитудная зависимость скоростей сейсмических волн // Физика Земли. — 2003. — № 12.
6. Опарин В. Н. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.

7. **Айзенберг-Степаненко М. В., Шер Е. Н.** Моделирование волновых явлений в структурированных средах // Физ. мезомеханика. — 2007. — Т. 10. — № 1.
8. **Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н.** Экспериментальная проверка одномерной расчетной модели распространения волн в блочной среде // ФТПРПИ. — 2005. — № 3.
9. **Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н.** О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5.
10. **Александрова Н. И., Шер Е. Н., Черников А. Г.** Влияние вязкости прослоек на распространение низкочастотных маятниковых волн в блочных иерархических средах // ФТПРПИ. — 2008. — № 3.
11. **Шер Е. Н., Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Черников А. Г.** Влияние иерархической структуры блочных горных пород на особенности распространения сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2007. — № 6.
12. **Александрова Н. И., Шер Е. Н.** Распространение волн в двумерной периодической модели блочной среды. Ч. 1. Особенности волнового поля при действии импульсного источника // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
13. **Егоров Г. В.** Нелинейные упругие эффекты в сухом и водонасыщенном пористом консолидированном образце // Физ. мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — № 1.
14. **Pyrak-Nolte L. J., L. R. Myer and N.G.W. Cook.** Transmission of seismic wave across single natural fractures, J. Geophys. Res., 1990, Vol. 95, No. 6.
15. **Mashinskii, E. I.** Seismo-microplasticity phenomenon in the rocks, Natural Science, 2010, 2 (3).
16. **Mashinskii, E. I.** Microplasticity effect in low-velocity zone induced by seismic wave, Journal of Applied Geophysics, 2012, 83.
17. **Clark V. A., Tittmann B. R., and Spencer T. W.** Effect of volatiles on attenuation ( $Q^{-1}$ ) and velocity in sedimentary rocks, J. Geophys. Res., 1980, 85, B10.
18. **Уракаев Ф. Х., Савинцев Ю. П., Шевченко В. С.** Механохимический синтез нецентросимметричных оксидных соединений // Изв. РАН. Сер. физическая. — 2011. — Т. 75. — № 8.
19. **Зайцев В. Ю., Сас П.** Влияние высокосжимаемой фракции пористости на вариации скоростей  $P$ - и  $S$ -волн в сухой и насыщенной породе: сопоставление модели и экспериментов // Физ. мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — № 1.

*Поступила в редакцию 5/III 2013*